

Study of the Influence of Atmospheric Air on the Active Medium of an Optically Pumped Rare Gases Laser

A. V. Juriev, Yu. A. Adamenkov, B. A. Vyskubenko, M. A. Gorbunov,
A. A. Kalacheva, V. A. Shaidulina

FSUE "RFNC – VNIIEF"

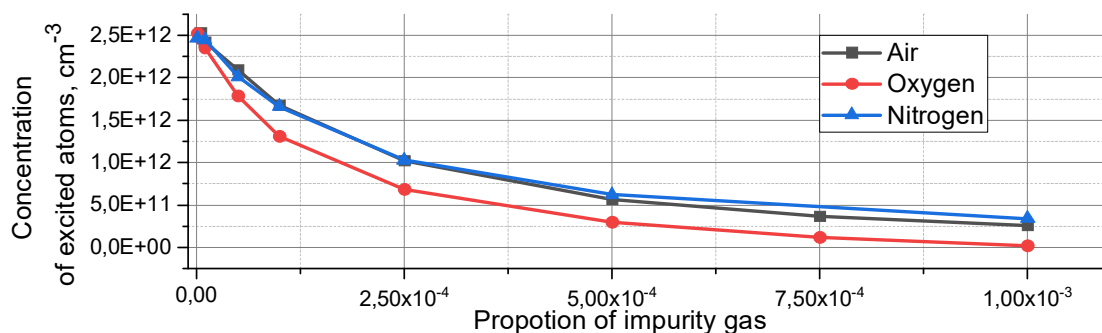
Sarov, 607190, Russia

oefimova@otd13.vniief.ru

Abstract

The paper presents a theoretical study of the influence of atmospheric air impurity on the active medium of an optically pumped rare gas laser. The active medium of the laser is formed by passing a pulse-periodic discharge through argon-helium plasma and represents excited states of argon at the lower levels of the $-s$ and $-p$ multiplets. The analysis of key reactions of interaction of nitrogen and oxygen particles with each other, with electrons and with argon and helium atoms is carried out. The key reactions of interaction that have the greatest effect on the particle concentration are selected. The kinetic model of Ar-He plasma is compiled and the reactions of interaction of inert gas atoms with nitrogen and oxygen atoms, molecules and ions are added. The concentration of excited argon atoms and other plasma particles is calculated. The calculation results demonstrate that when the proportion of impurity gases in the active medium of the laser exceeds 1×10^{-5} , their effect on the concentration of excited argon and helium atoms and ions becomes noticeable. When the proportion reaches 5×10^{-4} , the quenching of excited atoms due to collisions with nitrogen and oxygen begins to prevail over other quenching mechanisms.

Keywords: optically pump rare gas laser (OPRGL), inert gases, metastable atoms, kinetic model, molecular oxygen and nitrogen, quenching of excited atoms.



Average concentration of excited argon atoms in Ar-He plasma with nitrogen and oxygen

УДК: 621.378.2

Исследование влияния атмосферного воздуха на активную среду лазера с оптической накачкой на инертных газах

А. В. Юрьев, Ю. А. Адаменков, Б. А. Выскубенко, М. А. Горбунов,
А. А. Калачева, В. А. Шайдулина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Россия, Саров, 607190, ул. Мира, 37
oefimova@otd13.vniief.ru

Аннотация

В работе представлено теоретическое исследование влияния примесного атмосферного воздуха на активную среду лазера с оптической накачкой на инертных газах. Активная среда лазера образуется при прохождении импульсно-периодического разряда через Ar-He плазму и представляет собой возбужденные состояния аргона на нижних уровнях $-s$ и $-p$ мультиплетов.

Проведен анализ ключевых реакций взаимодействия частиц азота и кислорода друг с другом, с электронами и с атомами аргона и гелия. Выбраны ключевые реакции взаимодействия, оказывающие наибольшее влияние на концентрацию частиц. Кинетическая модель Ar-He плазмы составлена и дополнена реакциями взаимодействия атомов инертных газов с атомами, молекулами и ионами азота и кислорода. Проведены вычисления концентрации возбужденных атомов аргона и других частиц плазмы. Результаты вычислений продемонстрировали, что при доле примесных газов в активной среде лазера, превышающей 1×10^{-5} , их влияние на концентрацию возбужденных атомов и ионов аргона и гелия становится заметным. При достижении доли, равной 5×10^{-4} , тушение возбужденных атомов за счет столкновений с азотом и кислородом начинает преобладать над остальными механизмами тушения.

Ключевые слова: лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ), инертные газы, метастабильные атомы, кинетическая модель, молекулярный кислород и азот, тушение возбужденных атомов.

1. Введение

Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) – это новый тип газовых лазеров с оптической накачкой и высокой квантовой эффективностью, позволяющий преобразовать мощное излучение диодного лазера в мощное излучение газового лазера с хорошим качеством луча. В работе [1] была продемонстрирована первая генерация на длине волны 892.9 нм. В работах [2, 3] проведены теоретические исследования, направленные на повышение эффективности наработки метастабильных атомов. Преобладающее количество исследований было проведено при использовании аргона в качестве лазерной частицы [4–7], что обусловлено наибольшей доступностью аргона из всех инертных газов.

Предложенное сочетание технологий позволяет создать компактный лазер, который способен выдавать непрерывное излучение мощностью до нескольких мегаватт. Кроме того, активная среда такого лазера содержит только инертные газы, что существенно упрощает техническую реализацию и позволяет создать химически инертный вариант лазерной установки. В данный момент в России созданы лабораторные прототипы ЛОНИГ, при помощи

которых производится поиск наиболее подходящей смеси инертных газов в качестве активной среды, модернизируются разрядные условия и условия получения лазерной генерации.

К настоящему времени максимальная мощность лазерной генерации, равная 12.5 Вт, была достигнута при использовании смеси Ar-He [8]. В работах [9–11] получена лазерная генерация на атомах ксенона. В работах [12, 13] проведено экспериментальное и теоретическое исследование кинетики лазера на атомах криптона.

В ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ лазерная генерация ЛОНИГ впервые была получена в 2020 году на длине волны 912 нм при использовании аргон-гелиевой смеси [14]. С этого момента ведутся активные работы по увеличению мощности лазерной генерации ЛОНИГ и получению лазерной генерации на других инертных газах. Проводится теоретическое исследование активной среды ЛОНИГ для определения наиболее оптимальных условий получения генерации [15].

На рис. 1 представлены ключевые электронные уровни атомы аргона, участвующие в лазерном цикле (в обозначениях Пашена).

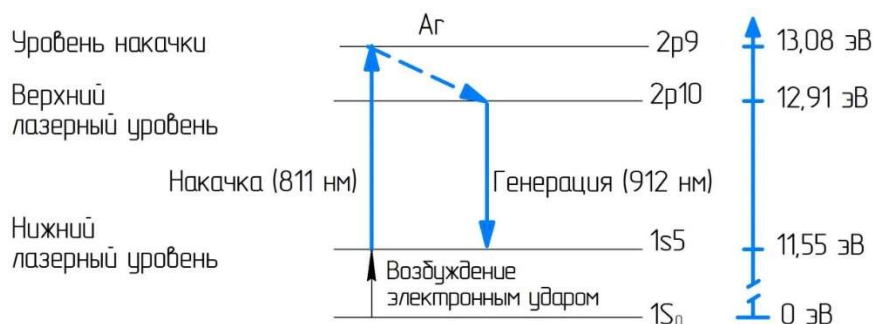


Рис. 1. Электронные уровни атома аргона

Нижний лазерный уровень 1s5 заполняется за счет электронного удара при прохождении разряда, далее с помощью диодной лазерной накачки атомы возбуждаются на уровень накачки 2p9 и благодаря безызлучательной релаксации заполняют верхний лазерный уровень 2p10. Между уровнями 2p10 и 1s5 образуется инверсия населенностей и развивается лазерная генерация.

Режим прокачки газовой смеси ЛОНИГ возможно осуществлять двумя способами – открытым, при котором газ после применения выпускается в атмосферу, и замкнутым, при котором одна и та же порция газа используется многократно. При проведении экспериментов по получению лазерной генерации при замкнутом режиме прокачки среды было обнаружено падение мощности генерации на 70 % в течение нескольких минут. Применение ловушки с жидким азотом, действие которой было направлено на охлаждение газовой смеси и вымораживания возможных примесей, способствовало увеличению мощности, но не решило проблему полностью. Учитывая, что в открытом режиме прокачки среды мощность лазерной генерации оставалась постоянной в течение нескольких часов, закономерным объяснением наблюдаемых результатов является загрязнение активной среды ЛОНИГ молекулярными газами. С наибольшей долей вероятности активная среда ЛОНИГ может быть загрязнена окружающим лазерную систему атмосферным воздухом.

Столкновения электронов или возбужденных атомов инертных газов с молекулярными газами, такими как углекислый газ, водяной пар, азот, кислород и другими, приводит к уменьшению средней энергии электронов и тушению возбужденных атомов, что негативно сказывается на генерируемой мощности лазера.

В данной работе представлено теоретическое исследование влияния атмосферного воздуха на параметры Ar-He плазмы импульсного разряда. Атмосферный воздух представлен как смесь азота и кислорода.

2. Кинетическая модель Ar-He плазмы

2.1. Частицы аргон-гелиевой плазмы

В кинетику модели аргон-гелиевой плазмы включено 10 энергетических состояний атомов аргона и гелия: атомы аргона Ar и гелия He в основном состоянии, атомы аргона Ar^* и гелия He^* в возбужденном состоянии, атомарные ионы аргона Ar^+ и гелия He^+ , гомоядерные ионы аргона Ar_2^+ и гелия He_2^+ , гетероядерный ион HeAr^+ и эксимерные молекулы аргона Ar_2^* [15]. Значения энергии возбуждения и ионизации частиц аргон-гелиевой плазмы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Энергия возбуждения и ионизации частиц аргон-гелиевой плазмы

Частица	Ar*	He*	Ar ⁺	He ⁺	Ar ₂ ⁺	He ₂ ⁺	HeAr ⁺	Ar ₂ [*]
Энергия, эВ	11.55	19.8	15.76	24.59	14.5	22.23	15.74	11.06

Указанные частицы принимают участие в 35 реакциях взаимодействия. Перечень данных реакций с указанием коэффициентов представлен в таблице 2. Значения коэффициентов реакций приведены в м³/с для реакций с двумя взаимодействующими частицами и м⁶/с для реакций с тремя взаимодействующими частицами. Энергия электронов T_e и температура атомов газа T_g измеряются в эВ и К соответственно.

Таблица 2

Реакции взаимодействия частиц аргон-гелиевой плазмы

№ реакции	Реакция	Коэффициент реакции, м ³ /с м ⁶ /с
Электронный удар		
1	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$	$\sigma(\epsilon)^1$
2	$e + \text{Ar} \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	$\sigma(\epsilon)$
3	$e + \text{Ar}^* \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	$\sigma(\epsilon)$
4	$e + \text{He} \rightarrow 2e + \text{He}^+$	$\sigma(\epsilon)$
5	$e + \text{He} \rightarrow e + \text{He}$	$\sigma(\epsilon)$
6	$e + \text{He}^* \rightarrow 2e + \text{He}^+$	$\sigma(\epsilon)$
7–8	$e + \text{He} \leftrightarrow e + \text{He}^*$	$\sigma(\epsilon)$
9–10	$e + \text{Ar} \leftrightarrow e + \text{Ar}^*$	$\sigma(\epsilon)$
Рекомбинация		
11	$\text{Ar}^+ + 2e \rightarrow \text{Ar}^* + e$	$8.6 \times 10^{-39} \cdot T_e^{-4.5}$ [16, 17, 18, 19]
12	$\text{Ar}_2^+ + e \rightarrow \text{Ar}^* + \text{Ar}$	$9.1 \times 10^{-14} \cdot T_e^{-0.67}$ [16, 18, 19, 20, 21, 22]
13	$\text{HeAr}^+ + e \rightarrow \text{Ar}^* + \text{He}$	$9.8 \times 10^{-14} \cdot T_e^{-0.61}$ [18,21,22]
14	$\text{He}^+ + 2e \rightarrow \text{He}^* + e$	$5.1 \times 10^{-39} \cdot T_e^{-4.5}$ [18]
15	$\text{Ar}^+ + e + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{He}$	$1.2 \times 10^{-47} \cdot T_g \cdot T_e^{-3.5}$ [18,21]
Передача положительного заряда		
16	$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$	$0.8 \times 10^{-43} \cdot \left(\frac{300}{T_g}\right)^{0.6}$ [18, 22, 23, 24, 25]
17	$\text{He}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{Ar}$	$1.7 \times 10^{-43} \cdot \left(\frac{300}{T_g}\right)^{0.6}$ [17, 25]
18	$\text{He}_2^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{He}$	2.2×10^{-16} [18, 21, 22, 25]
19	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{He}$	$1.1 \times 10^{-43} \cdot \left(\frac{300}{T_g}\right)^{0.4}$ [18, 25]

¹ База данных LXCat

20	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$	$2.3 \times 10^{-43} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.4} [17, 18, 19, 22, 25, 26]$
21	$\text{Ar}^+ + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-44} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [18, 26]$
22	$\text{Ar}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{Ar}$	$2.5 \times 10^{-44} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [18, 26]$
23	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$2.5 \times 10^{-44} [26]$
24	$\text{Ar}_2^+ + e \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$	$1.4 \times 10^{-12} \cdot e^{-\frac{2.06}{T_e}} [18]$
25	$\text{HeAr}^+ + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{He}$	$1.2 \times 10^{-17} \cdot e^{-\frac{298}{T_r}} \cdot T_r^{0.5} [18]$
26	$\text{HeAr}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{Ar}$	$2.9 \times 10^{-17} \cdot e^{-\frac{298}{T_r}} \cdot T_r^{0.5} [18]$
Ионизация Пеннинга		
27	$\text{He}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + e$	$7.6 \times 10^{-17} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5} [18, 21, 25, 26]$
28	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$	$5.0 \times 10^{-16} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5} [27]$
29	$\text{He}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + e$	$4.9 \times 10^{-17} [18]$
Образование и тушение эксимерных молекул аргона		
30	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{He}$	$1.8 \times 10^{-43} \cdot T_r^{-0.6} [18]$
31	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{Ar}$	$3.6 \times 10^{-43} \cdot T_r^{-0.6} [18]$
32	$\text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar} + h\nu$	$3.1 \times 10^5 [18]$
33	$\text{Ar}_2^* + \text{He} \rightarrow 2\text{Ar} + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-20} [21]$
Тушение возбужденных атомов аргона		
34	$\text{Ar}^* + \text{He} \rightarrow \text{Ar} + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-20} \cdot \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5} [21]$
35	$\text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar} + h\nu$	$1.0 \times 10^5 [19]$

Функция распределения электронов по энергиям определялась посредством решения кинетического уравнения Больцмана. При известном сечении реакции $\sigma(\varepsilon)$ и функции распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon)$ коэффициент реакции k определяется из соотношения

$$k = \sqrt{\frac{2q_e}{m_e}} \cdot \int_0^\infty \varepsilon \cdot \sigma(\varepsilon) \cdot f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

где q_e и m_e – заряд и масса электрона.

Коэффициенты реакции взаимодействия с электронами, для которых неизвестны сечения реакции, записывались в форме уравнения Аррениуса

$$k = A \cdot T_e^n \cdot e^{-\frac{m}{T_e}}, \quad (2)$$

где T_e – средняя энергия электронов плазмы (эВ).

Коэффициенты реакции взаимодействия атомов и ионов записывались в форме

$$k = A \cdot T_r^n \cdot e^{-\frac{m}{T_r}}, \quad (3)$$

где T_r – температура тяжелых частиц плазмы (К).

Скорость R_{ij} реакции между частицами i и j связана с коэффициентом реакции k_{ij} соотношением

$$R_{ij} = k_{ij} \cdot n_i \cdot n_j, \quad (4)$$

где n_i и n_j – концентрации взаимодействующих частиц.

1.2. Начальные расчетные условия

Активной средой ЛОНИГ является плазма инертных газов, инициированная импульсно-периодическим разрядом. На рис. 2 представлены значения напряжения в разряде, вводимые в качестве начальных параметров расчета. Длительность разрядного импульса 40 нс по полувывсоте, амплитуда напряжения 1000 В и частота повторения импульсов 100 кГц. Параметры разряда выбраны в соответствии с экспериментальными значениями.

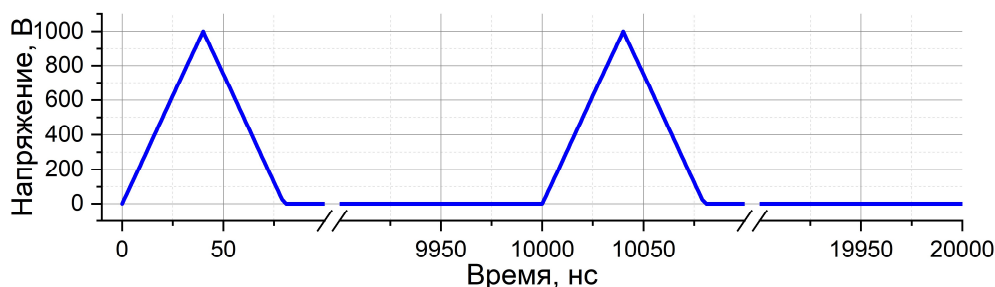


Рис. 2. Значения напряжения в разряде в различные моменты времени

При проведении расчетов устанавливались и оставались неизменными следующие параметры:

- Температура нейтральных частиц и ионов – 350 К.
- Давление газа – 1 атм.
- Смесь аргона и гелия – 2 % аргона и 98 % гелия.
- Расстояние между электродами – 3 мм.

Начальная концентрация всех ионов составляла 10^7 см^{-3} , начальная концентрация заряженных частиц и эксимерных молекул – 10^{10} см^{-3} . Начальная концентрация электронов устанавливалась равной сумме начальных концентраций ионов. Получаемые результаты расчетов не зависят от начальных значений концентрации, если начальная концентрация установлена на порядки меньше, чем результирующее значение концентрации частицы, определяемой при расчете. Начальная температура электронов и функция распределения электронов по энергиям рассчитывается посредством решения кинетического уравнения Больцмана. Ввиду неравновесности плазмы решение уравнения Больцмана и переопределение функции распределения электронов по энергиям и средней температуры электронов происходит на каждом расчетном шаге.

Для проведения расчетов был применен модуль Plasma в программном пакете Comsol Multiphysics.

3. Кинетическая модель Ar-He-O₂ плазмы

3.1. Частицы кислорода

Для исследования влияния кислорода на кинетические процессы Ar-He плазмы в созданную модель Ar-He плазмы было добавлено 16 энергетических состояний атомов и молекул кислорода: молекулярный кислород в основном состоянии O₂, возбужденный молекулярный кислород O₂(a¹Δ_g) и O₂(b¹Σ_g⁺), кислород в основном состоянии O и O₃, атомарный кислород в возбужденных состояниях O(1D), O(1S) и O(3P³), катионы кислорода O⁺, O₂⁺ и O₄⁺, анионы кислорода O⁻, O₂⁻, O₃⁻ и O₄⁻ [28–33].

Дополнительно были учтены возбуждение объединенных вращательных уровней, 41 колебательного уровня и электронных уровней O₂(a³Δ_u) и O₂(b³Σ_u⁻) молекулярного кислорода. Рассматривалось только возбуждение атомов при соударении с электронами для учета потерь энергии.

В таблице 3 приведены: энергия возбуждения электронных уровней атома кислорода, энергия вращательных, колебательных и электронных уровней молекулы кислорода, энергия ионизации атомов и молекул кислорода и энергия сродства электрона к атомарному и молекулярному кислороду.

Таблица 3

Энергии возбуждения, ионизации и сродства атомов и молекул кислорода

Частица	O ₂ (вращ.)	O ₂ (колеб.)	O ₂ ($\alpha^1\Delta_g$)	O ₂ ($b^1\Sigma_g^+$)	O ₂ ($\alpha^3\Delta_u$)	O ₂ ($b^3\Sigma_u^-$)	O ₂ ⁺
E, эВ	0.02	0.20 ÷ 4.48	0.98	1.63	4.50	6.01	12.10
Частица	O(1D)	O(1S)	O(3P3p)	O ⁺	O ⁻	O ₂ ⁻	
E, эВ	1.97	4.19	10.99	13.6	1.47	0.44	

В модель было введено 220 реакций взаимодействия частиц кислорода друг с другом, с электронами и с атомами аргона и гелия. Полный перечень введенных в модель реакций представлен в работах [28–33]. Ввиду того, что доля кислорода в смеси на несколько порядков меньше доли аргона и гелия, то большая часть введенных в модель энергетических состояний кислорода в плазме имеет пренебрежимо малую концентрацию и незначительное влияние на параметры плазмы.

Для упрощения кинетической модели были проведены расчеты возбужденных атомов аргона с помощью полной модели и модели, из которой были исключены частицы кислорода – O⁻, O₃, O₃⁻, O₄⁻, O₄⁺. На рис. 3 представлены результаты расчета.

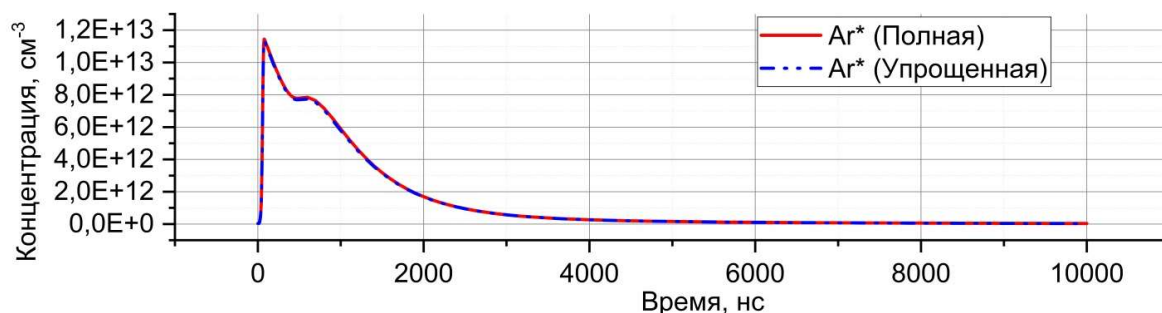


Рис. 3. Сравнение результатов расчета концентрации возбужденных атомов аргона с помощью полной и упрощенной моделей

Результаты расчета, полученные при использовании моделей с полной и упрощенной кинетикой кислорода, отличаются не более чем на 1 %. Вышеуказанные частицы кислорода могут быть исключены из кинетической модели, поскольку они не оказывают влияния на концентрацию частиц или другие параметры плазмы.

Значение имеют 40 реакций взаимодействия атомов аргона и гелия с частицами кислорода – O, O⁺, O₂⁺ и O₂⁻. Перечень данных реакций с указанием коэффициентов реакций приведен в таблице 4. Значения коэффициентов реакций приведены в м³/с для реакций с двумя взаимодействующими частицами и м⁶/с для реакций с тремя взаимодействующими частицами. Энергия электронов T_e и температура атомов газа T_г измеряются в эВ и К соответственно.

Таблица 4

**Ключевые реакции взаимодействия частиц кислорода с указанием
коэффициентов реакций**

	Реакция	Коэффициент реакции, м ³ /с (м ⁶ /с)
Взаимодействие с электронами		
1	$e + O \leftrightarrow e + O(1D)$	$\sigma(\varepsilon)^2$
2	$e + O \leftrightarrow e + O(1S)$	$\sigma(\varepsilon)$
3	$e + O \leftrightarrow e + O(3P3p)$	$\sigma(\varepsilon)$
4	$e + O^- \rightarrow 2e + O$	$\sigma(\varepsilon)$
5	$e + O_2 \rightarrow 2e + O_2^+$	$\sigma(\varepsilon)$
6	$e + O_2 \leftrightarrow e + O_2(a^1\Delta_g)$	$\sigma(\varepsilon)$
7	$e + O_2 \leftrightarrow e + O_2(b^1\Sigma_g^+)$	$\sigma(\varepsilon)$
8	$e + O_2 \leftrightarrow e + O + O$	$\sigma(\varepsilon)$
9	$e + O_2 \leftrightarrow e + O + O(1D)$	$\sigma(\varepsilon)$
10	$e + O_2 \rightarrow O + O^-$	$\sigma(\varepsilon)$
11	$e + O_2(a^1\Delta_g) \leftrightarrow e + O_2(b^1\Sigma_g^+)$	$\sigma(\varepsilon)$
12	$e + O_2 \rightarrow O_2^-$	$\sigma(\varepsilon)$
13	$O^+ + e + He \rightarrow O + He$	$5.0 \times 10^{-39} \cdot T_e^{-0.5}$ [28]
14	$O_2^+ + e + He \rightarrow O_2 + He$	$5.0 \times 10^{-39} \cdot T_e^{-0.7}$ [28]
15	$O_2 + O_2 + e \rightarrow O_2 + O_2^-$	$4.0 \times 10^{-39} \cdot T_e^{-1}$ [28]
16	$O_2 + e + He \rightarrow O_2^- + He$	1×10^{-43} [29]
Взаимодействие частиц кислорода		
17	$O^- + O \rightarrow O_2 + e$	$3.0 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [30] $1.9 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28] $5.0 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [31]
18	$O(1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$	$3.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [31]
19	$O_2^- + O \rightarrow O_2 + O^-$	$3.3 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [32]
20	$O(1S) + O_2 \rightarrow O + O_2$	$3.0 \times 10^{-27} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [31]
21	$O(1S) + O \rightarrow O + O$	$3.0 \times 10^{-27} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [31]
Взаимодействие частиц кислорода с аргоном и гелием		
22	$He^* + O_2 \rightarrow He + O_2^+ + e$	$2.5 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]
23	$He^* + O_2 \rightarrow He + O^+ + O + e$	$2.7 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]
24	$He^+ + O_2 \rightarrow He + O_2^+$	$3.8 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]
25	$He^+ + O_2 \rightarrow He + O + O^+$	$6.2 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]
26	$He_2^+ + O_2 \rightarrow He + He^+ + O_2^+$	$3.9 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]
27	$He_2^+ + O_2 \rightarrow He + He + O + O^+$	$6.2 \times 10^{-16} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [28]

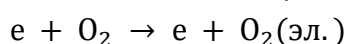
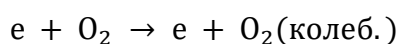
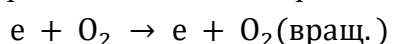
² База данных LXCat

28	$\text{Ar}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{O}_2^+$	$4.9 \times 10^{-17} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.78} [30]$
29	$\text{Ar}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{Ar} + \text{O}$	$2.8 \times 10^{-13} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [38]$
30	$\text{Ar} + \text{O}(1\text{D}) \rightarrow \text{Ar} + \text{O}$	$3.0 \times 10^{-19} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [38]$
31	$\text{Ar}^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{O}(1\text{D}) + \text{O}(1\text{S})$	$1.0 \times 10^{-16} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [33]$
32	$\text{Ar}^* + \text{O} \rightarrow \text{Ar} + \text{O}(3\text{p})$	$5.0 \times 10^{-17} \cdot T_r^{0.5} [33]$
33	$\text{He} + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
34	$\text{He} + \text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
35	$\text{He} + \text{O}_2(a^3\Delta_u) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
36	$\text{He} + \text{O}(1\text{D}) \rightarrow \text{He} + \text{O}$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
37	$\text{He} + \text{O}(1\text{S}) \rightarrow \text{He} + \text{O}$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
38	$\text{He} + \text{O}(3\text{p}) \rightarrow \text{He} + \text{O}$	$8.0 \times 10^{-21} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [28]$
39	$\text{He} + \text{O} + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2(a^1\Delta_g)$	$1.3 \times 10^{-42} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [31]$
40	$\text{He} + \text{O} + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$	$6.0 \times 10^{-43} \cdot \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5} [31]$

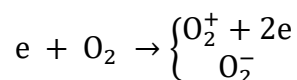
3.2. Ключевые реакции взаимодействия кислорода

До прохождения разрядного импульса кислород в активной среде преимущественно представлен молекулами кислорода O_2 . Концентрацию остальных состояний кислорода можно считать пренебрежимо малой.

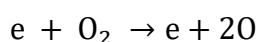
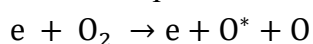
При прохождении разряда столкновения молекул кислорода с электронами приводят к возбуждению колебательных, вращательных и электронных уровней:



Столкновения электронов с молекулой кислорода приводят к образованию молекулярных катионов и анионов:

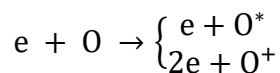


Столкновения электронов с молекулами кислорода приводят к диссоциации, после которой один из атомов кислорода может перейти в возбужденное состояние:



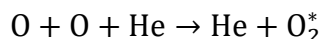
Атомы кислорода, возникшие при диссоциации, составляют приблизительно 95 % от общего количества атомарного кислорода.

Столкновения электронов с образовавшимся атомарным кислородом приводят к возбуждению его электронных уровней или образованию атомарных ионов кислорода:

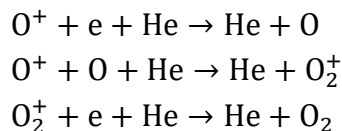


После прохождения разряда ввиду малой концентрации кислорода в смеси процессы тушения и рекомбинации происходят преимущественно при столкновениях частиц кислорода с атомами аргона и гелия.

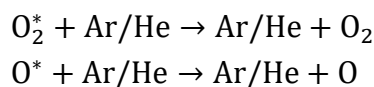
После прохождения разряда происходит объединение атомов кислорода в молекулу кислорода в возбужденном состоянии при трехчастичных столкновениях:



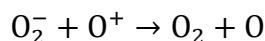
Также при трехчастичных столкновениях происходит передача положительного заряда между катионами кислорода и их рекомбинация:



Возбужденные атомы и молекулы кислорода тушатся при столкновениях с атомами аргона и гелия:



Анионы кислорода после прохождения разряда участвуют в рекомбинации при взаимодействии с катионами кислорода:

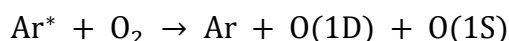


Частицы кислорода оказывают на аргон-гелиевую плазму негативное влияние, обусловленное тремя механизмами:

- тушение возбужденных атомов аргона и гелия при передаче энергии возбуждения или ионизации Пеннинга;
- уменьшение концентрации ионов аргона и гелия при передаче заряда частицам кислорода;
- уменьшение концентрации и средней энергии электронов в разряде.

3.3. Тушение возбужденных атомов аргона и гелия при столкновениях с атомами и молекулами кислорода

Негативное влияние кислорода на аргон-гелиевую плазму заключается в тушении возбужденных атомов аргона при диссоциативной передаче возбуждения, ионизации молекулярного кислорода или возбуждении атомарного кислорода. Наибольшее влияние оказывает тушение при диссоциации молекулярного кислорода с последующим возбуждением образовавшихся атомов:



Имеет значение тушение возбужденных атомов аргона при столкновении с атомом кислорода $\text{Ar}(1s5)$ и возбуждением его на уровень $\text{O}(3p3P)$:



Ввиду близких значений энергии возбужденных атомов аргона (11.55 эВ) и кислорода (10.99 эВ) данная реакция оказывает на концентрацию возбужденных атомов аргона заметное влияние.

На рис. 4 показано отношение скорости тушения Ar^* при столкновении с атомами и молекулами кислорода к суммарной скорости тушения Ar^* в плазме в зависимости от доли кислорода в активной среде.

При доле кислорода в смеси, равной 5×10^{-4} , половину от общей скорости тушения возбужденных атомов аргона составляет тушение при соударениях с частицами кислорода. Снижение концентрации метастабильных атомов аргона при соударениях с кислородом приводит к уменьшению инверсии населенностей и мощности лазерной генерации.

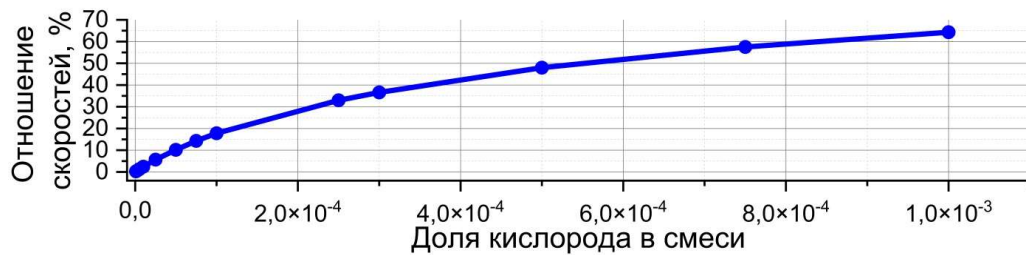
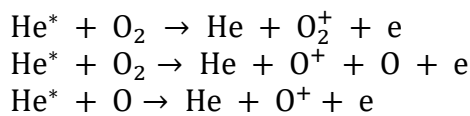


Рис. 4. Отношение скорости тушения возбужденных атомов аргона при столкновении с кислородом к общей скорости тушения

Дополнительным негативным воздействием частиц кислорода является тушение возбужденных атомов гелия в реакциях диссоциации и ионизации. Наибольшее влияние оказывает ионизация Пеннинга:



На рис. 5 показано отношение скорости тушения возбужденных атомов гелия при взаимодействии с кислородом к суммарной скорости тушения возбужденных атомов гелия в зависимости от доли кислорода в активной среде.

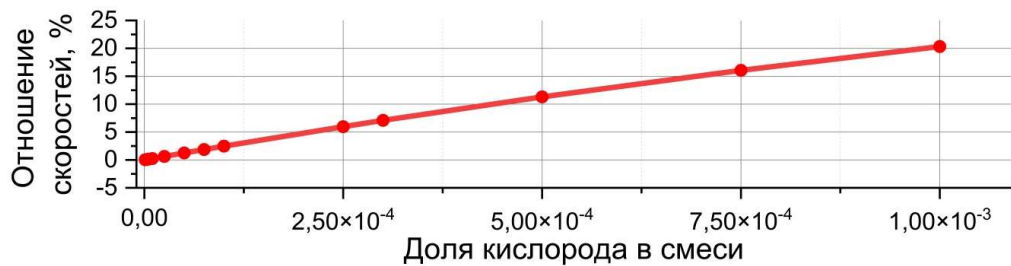
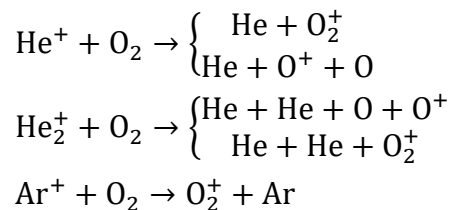


Рис. 5. Отношение скорости тушения возбужденных атомов гелия при столкновении с кислородом к общей скорости тушения

После прохождения разряда возбужденные атомы гелия принимают участие в цепочке $\text{He}^* \rightarrow \text{Ar}^+ \rightarrow \text{Ar}^*$. Снижение концентрации возбужденных атомов гелия приводит к уменьшению скорости ионизации Пеннинга атомов аргона, что приводит к уменьшению концентрации возбужденных атомов аргона.

3.4. Уменьшение концентрации ионов аргона и гелия при столкновениях с атомами и молекулами кислорода

При соударениях ионов аргона и гелия с молекулами кислорода концентрация ионов уменьшается. Наибольшее значение имеют реакции перезарядки:



На рисунке 6 показано отношение скорости уменьшения концентрации ионов гелия и аргона при передаче заряда кислороду к суммарной скорости уменьшения концентрации ионов в зависимости от доли кислорода в активной среде.

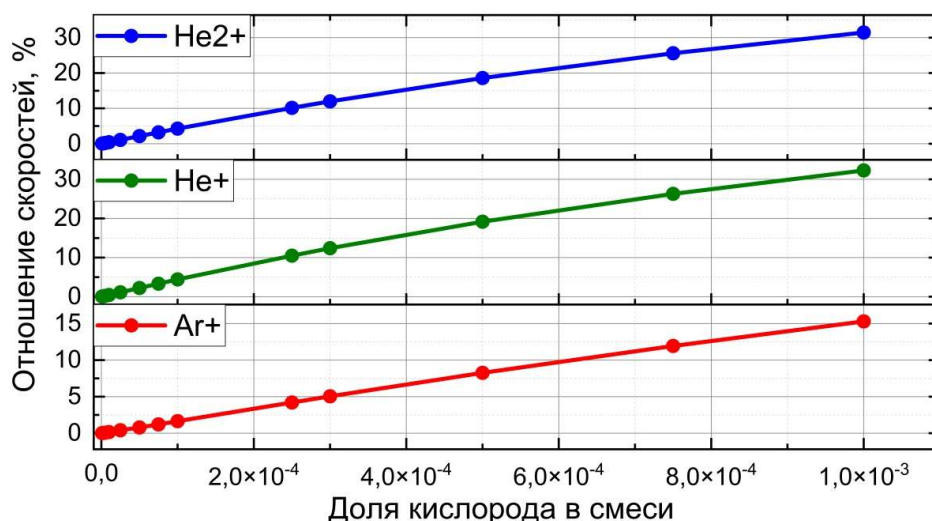
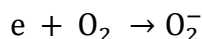


Рис. 6. Отношение скорости уменьшения концентрации ионов гелия и аргона при передаче заряда кислороду к общей скорости уменьшения концентрации ионов

Поскольку концентрация метастабильных атомов аргона после прохождения разряда увеличивается за счет рекомбинации ионов, то передача положительного заряда атомам и молекулам кислорода приводит к снижению концентрации возбужденных атомов аргона. Уменьшение концентрации ионов кислорода преимущественно происходит при рекомбинации.

3.5. Уменьшение концентрации и средней энергии электронов при неупругих соударениях с атомами и молекулами кислорода

Поскольку кислород является электроотрицательным газом, то соударение электрона с молекулой кислорода приводит к прилипанию электрона и образованию анионов:



Протекание данной реакции уменьшает концентрацию электронов, что приводит к уменьшению общего заряда плазмы.

На рис. 7 показано отношение скорости уменьшения концентрации электронов за счет взаимодействия с кислородом к суммарной скорости уменьшения концентрации электронов в зависимости от доли кислорода в активной среде.

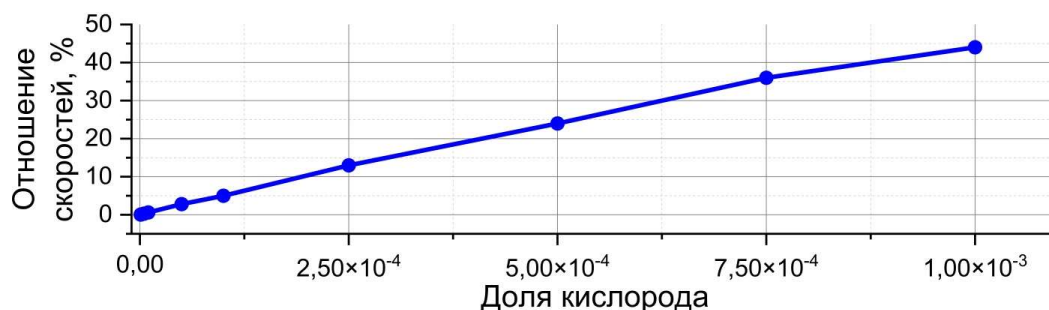
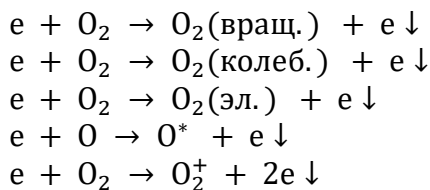


Рис. 7. Отношение скорости уменьшения концентрации электронов при соударениях с кислородом к общей скорости уменьшения концентрации электронов

Поскольку кислород имеет существенно меньшую энергию возбуждения по сравнению с аргоном и гелием, то при неупругих столкновениях с атомами и молекулами кислорода электроны более интенсивно теряют энергию в реакциях возбуждения, диссоциации и ионизации, чем в чистой Ar-He смеси:



При протекании данных реакций уменьшается средняя энергия электронов. Проведенные расчеты продемонстрировали, что возбуждение колебательных и вращательных уровней влияет на энергию электронов незначительно.

На рис. 8 показаны результаты расчета отношения максимальной средней энергии электронов в загрязненной кислородом плазме к максимальной средней энергии электронов в чистой смеси. Максимальное значение средней энергии электронов в среде без примесей составило 6.8 эВ.

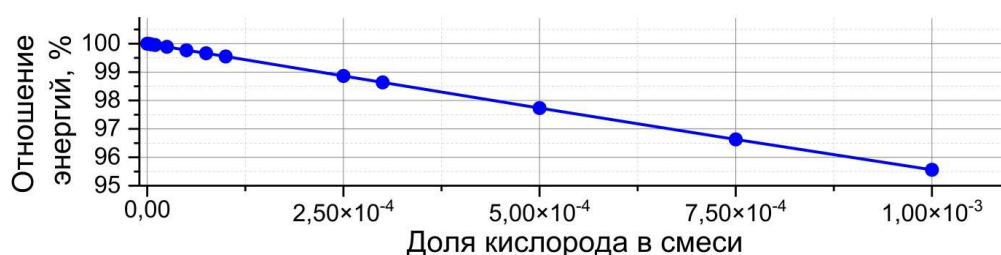


Рис. 8. Отношение максимальной средней энергии электронов в загрязненной кислородом смеси и в чистой смеси

Снижение концентрации и средней энергии электронов приводит к уменьшению концентрации возбужденных и ионизированных атомов и дестабилизирует разряд.

4. Кинетическая модель Ar-He-N₂ плазмы

4.1. Частицы азота

Влияние азота и кислорода на Ar-He плазму происходит посредством одинаковых механизмов.

Для исследования влияния азота на кинетические процессы Ar-He плазмы в модель Ar-He плазмы было добавлено 6 энергетических состояний атомов и молекул азота: молекулярный азот в основном состоянии N₂, возбужденный молекулярный азот N₂(C³Π_u) и N₂(B³Π_g), атомарный азот в основном состоянии N и молекулярный и атомарный ионы азота N₂⁺ и N⁺.

В отличие от кислорода, азот не является электроотрицательным газом, ввиду чего анионы азота в кинетической модели не рассматривались. С помощью кинетической модели было рассмотрено влияние молекул и ионов азота N₃, N₄, N₃⁺, N₄⁺ по аналогии с кислородом. Эти и более сложные состояния азота были исключены из конечной версии кинетической модели ввиду их малой концентрации и незначительного влияния на плазму. Дополнительно были учтены возбуждение вращательных и колебательных уровней. Рассматривалось только возбуждение атомов при соударении с электронами для учета потерь их энергии.

В таблице 5 приведены энергия возбуждения электронных уровней атома азота, энергия вращательных, колебательных и электронных уровней молекулы азота и энергия ионизации атомов и молекул азота.

В модель было введено 28 реакций взаимодействия частиц азота друг с другом, с электронами и с атомами аргона и гелия. Полный перечень введенных в модель реакций представлен в таблице 6. Значения коэффициентов реакций приведены в м³/с для реакций с двумя взаимодействующими частицами и м⁶/с для реакций с тремя взаимодействующими частицами. Энергия электронов T_e и температура атомов газа T_г измеряются в эВ и К соответственно.

Таблица 5

Энергии возбуждения, ионизации и средства атомов и молекул азота

Частица	N ₂ (вращ.)	N ₂ (колеб.)	N ₂ (C ³ Π _u)	N ₂ (B ³ Π _g)	N ₂ ⁺	N ⁺
E, эВ	0.02	0.573 ÷ 3.959	11.19	8.45	15.58	14.54

Таблица 6

Ключевые реакции взаимодействия частиц азота с указанием коэффициентов реакций

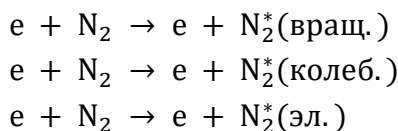
№	Реакция	Коэффициент реакции, м ³ /с (м ⁶ /с)
Взаимодействие с электронами		
1	$e + N_2 \rightarrow e + N_2$	$\sigma(\epsilon)^3$
2	$e + N_2 \rightarrow 2e + N_2^+$	$\sigma(\epsilon)$
3	$e + N_2^+ \rightarrow N + N$	$\sigma(\epsilon)$
4	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(C^3\Pi_u)$	$\sigma(\epsilon)$
5	$2e + N_2^+ \rightarrow N_2 + e$	3.2×10^{-42} [29]
6	$e + N_2^+ \rightarrow 2N$	$2.4 \times 10^{-14} \cdot T_e^{-0.5}$ [29]
7	$N_2^+ + He + e \rightarrow N_2 + He$	$5.0 \times 10^{-35} \cdot T_e^{-0.2}$ [39]
8	$N^+ + He + e \rightarrow N + He$	$5.0 \times 10^{-35} \cdot T_e^{-0.2}$ [39]
Взаимодействие с аргоном и гелием		
9	$Ar^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + Ar$	$4.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{T_r}{300})^{0.5}$ [34]
10	$He^* + N_2 \rightarrow He + N_2^+ + e$	$7.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{T_r}{300})^{0.5}$ [35]
11	$He^* + N_2 + He \rightarrow He + He + N_2^+ + e$	$1.7 \times 10^{-42} \cdot (\frac{T_r}{300})^{0.5}$ [35]
12	$He^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + He$	6.5×10^{-16} [35]
13	$He^+ + N_2 \rightarrow N^+ + N + He$	7.0×10^{-16} [29]
14	$He_2^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + He + He$	1.1×10^{-15} [35]
15	$Ar^* + N_2 \rightarrow Ar + N + N$	$1.6 \times 10^{-17} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [36]
16	$Ar^* + N_2 \rightarrow Ar + N_2(C^3\Pi_u)$	$3.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [37]
17	$Ar^* + N_2 \rightarrow Ar + N_2(B^3\Pi_g)$	$9.8 \times 10^{-18} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [37]
18	$He + N_2(C^3\Pi_u) \rightarrow He + N_2$	$1.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [29]
19	$He + N_2(B^3\Pi_g) \rightarrow He + N_2$	$1.0 \times 10^{-17} \cdot (\frac{300}{T_r})^{0.5}$ [29]
20	$He^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+ + He + He$	1.1×10^{-41} [35]
21	$He_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+ + He + He + He$	1.1×10^{-41} [35]
Взаимодействие частиц азота друг с другом		
23	$N + N + N_2 \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2$	$4.4 \times 10^{-45} \cdot (\frac{T_r}{300})^{0.5}$ [34]
24	$N^+ + N_2 + N \rightarrow N_2^+ + N_2$	1.0×10^{-41} [34]
25	$N^+ + N + N \rightarrow N_2^+ + N$	1.0×10^{-41} [34]
26	$N_2^+ + N \rightarrow N^+ + N_2$	8.4×10^{-19} [34]
Взаимодействие кислорода и азота		
27	$N_2^+ + O_2^- + He \rightarrow N_2 + O_2 + He$	$2.0 \times 10^{-37} \cdot (\frac{300}{T_r})^{2.5}$ [29]
28	$N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^+$	$1.0 \times 10^{-15} \cdot T_r^{-0.2}$ [29]

³ База данных LXCat

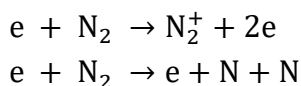
4.2. Механизмы увеличения и уменьшения концентрации частиц азота

До прохождения разряда азот в активной среде представлен молекулами азота N_2 . Концентрацию остальных состояний азота можно считать пренебрежимо малой.

При прохождении разряда столкновения молекул азота с электронами приводят к возбуждению колебательных, вращательных и электронных уровней:



Столкновения электронов с молекулами азота приводят к образованию молекулярных катионов и к диссоциации:

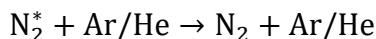


После прохождения разряда ввиду малой концентрации азота в смеси процессы тушения и рекомбинации происходят преимущественно при столкновениях частиц азота с атомами аргона и гелия.

При трехчастичных столкновениях происходит рекомбинация ионов азота:



Возбужденные молекулы азота тушатся при столкновениях с атомами аргона или гелия:



4.3. Тушение возбужденных атомов аргона и гелия при столкновениях с молекулами азота

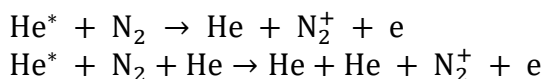
Негативное влияние частиц азота на аргон-гелиевую плазму заключается в тушении возбужденных атомов аргона при столкновительной передаче возбуждения или ионизации молекулярного азота. Наибольшее влияние оказывает тушение при столкновении с молекулами азота:



Данная реакция происходит с большой скоростью, поскольку энергии электронных уровней $N_2(C^3P_u)$ и $Ar(1s5)$ близки по значению и составляют 11.19 эВ и 11.55 эВ.

Снижение концентрации метастабильных атомов аргона при соударениях с азотом приводит к уменьшению времени жизни возбужденных атомов в течение периода, уменьшению инверсии населенностей и мощности лазерной генерации.

Дополнительным негативным воздействием азота является тушение возбужденных атомов гелия в реакциях диссоциации и ионизации. Наибольшее влияние оказывает ионизация Пеннинга:



На рис. 9 показано отношение скорости тушения возбужденных атомов гелия и аргона при соударениях с молекулами азота к суммарной скорости уменьшения концентрации ионов в зависимости от доли азота в активной среде.

Снижение концентрации возбужденных атомов гелия приводит к уменьшению скорости ионизации Пеннинга атомов аргона и, следовательно, к уменьшению общего положительного заряда в плазме и концентрации возбужденных атомов аргона.

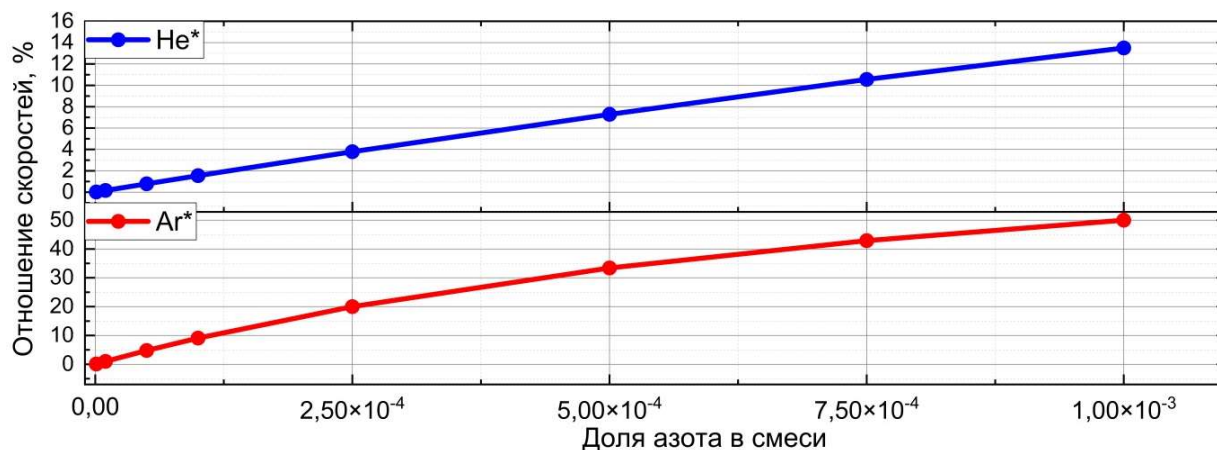
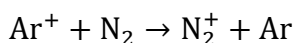
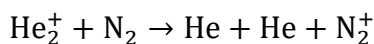
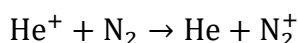


Рис. 9. Отношение скорости тушения возбужденных атомов гелия и аргона при столкновениях с молекулами азота к общей скорости тушения

4.4. Уменьшение концентрации ионов аргона и гелия при столкновениях с атомами и молекулами азота

При соударениях ионов аргона и гелия с молекулами азота концентрация ионов уменьшается. Наибольшее значение имеют реакции перезарядки:



На рис. 10 показано отношение скорости уменьшения концентрации ионов гелия и аргона при передаче заряда азоту к суммарной скорости уменьшения концентрации ионов в зависимости от доли азота в активной среде.

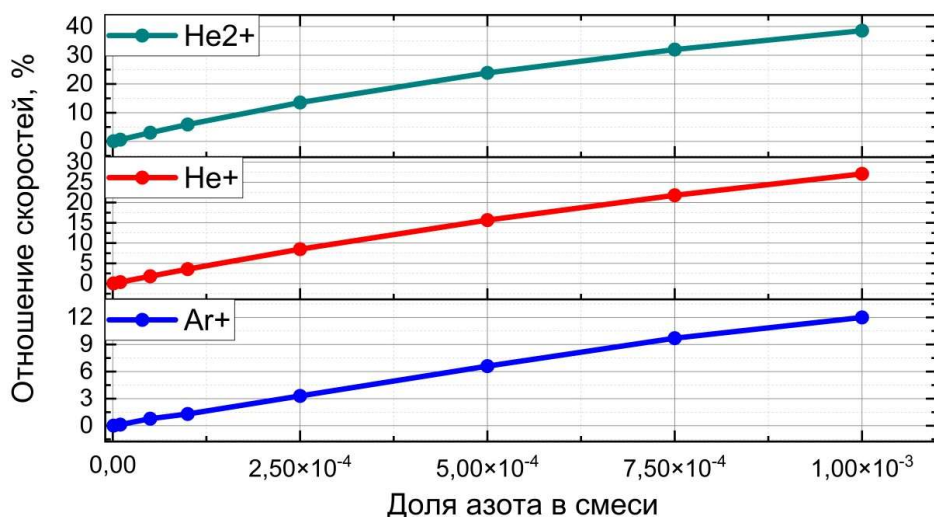
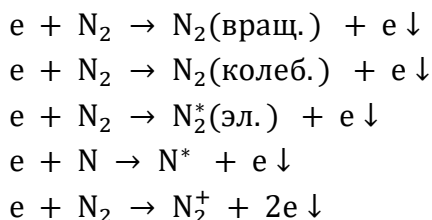


Рис. 10. Отношение скорости уменьшения концентрации ионов гелия и аргона при передаче заряда атомам и молекулам азота к общей скорости уменьшения концентрации ионов

Поскольку концентрация метастабильных атомов аргона после прохождения разряда увеличивается за счет рекомбинации ионов, то передача положительного заряда атомам и молекулам азота приводит к снижению концентрации возбужденных атомов аргона.

4.5. Уменьшение средней энергии электронов при неупругих соударениях с атомами и молекулами азота

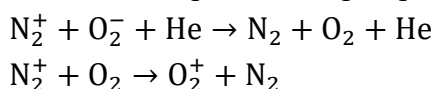
Азот имеет существенно меньшую энергию возбуждения по сравнению с аргоном и гелием, поэтому при неупругих столкновениях с атомами и молекулами азота электроны более интенсивно теряют энергию в реакциях возбуждения, диссоциации и ионизации, чем в чистой Ar-He смеси:



При протекании данных реакций уменьшается средняя энергия электронов. Снижение средней энергии электронов приводит к уменьшению концентрации возбужденных и ионизированных атомов и дестабилизирует разряд.

4.6. Взаимодействие азота и кислорода в плазме

Ввиду низкой концентрации скорости реакций взаимодействия азота и кислорода оказываются малыми. Имеют значение только реакции перезарядки:



5. Расчет концентрации возбужденных атомов аргон-гелиевой плазмы, загрязненной азотом и кислородом

С помощью кинетической модели аргон-гелиевой плазмы, загрязненной кислородом и азотом, были проведены расчеты концентрации возбужденных атомов аргона в зависимости от доли примесных газов в смеси. Значения концентрации были усреднены по времени периода разрядного импульса.

На рис. 11 представлены результаты расчета усредненной концентрации возбужденных атомов аргона для случая загрязнения активной среды кислородом ($10^{-6} \div 10^{-3}$), азотом ($10^{-6} \div 10^{-3}$) и воздухом ($10^{-6} \div 10^{-3}$). Воздух вводился в модель как смесь кислорода O_2 и азота N_2 (1 : 4).

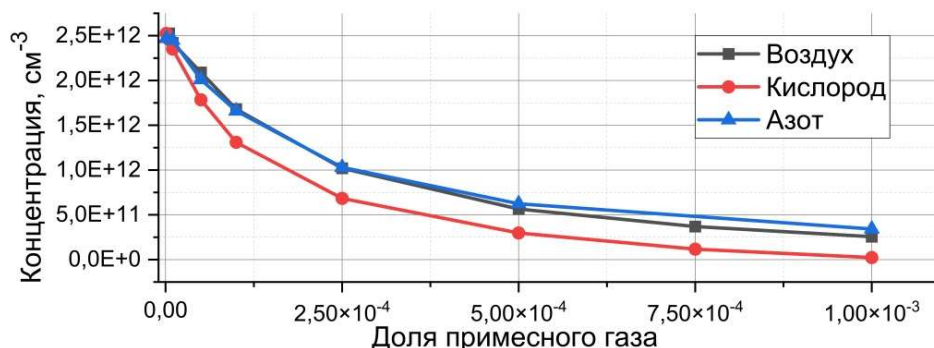


Рис. 11. Средняя концентрация возбужденных атомов аргона в активной среде с азотом и кислородом

Полученные результаты расчета демонстрируют необходимость поддержания в активной среде ЛОНИГ концентрации примесных газов не более 1×10^{-5} . В случае более высокой

концентрации процессы тушения возбужденных атомов и уменьшения концентрации ионов аргона и гелия при взаимодействии с частицами кислорода и азота преобладают над всеми остальными механизмами.

6. Заключение

В ходе проведения данной работы была создана кинетическая модель Ar-He-O₂-N₂ плазмы импульсного разряда. Было проведено теоретическое исследование процессов взаимодействия частиц аргон-гелиевой плазмы с кислородом и азотом и выявлены механизмы взаимодействия, оказывающие наибольшее влияние на концентрацию возбужденных атомов аргона. Проведены расчеты концентрации возбужденных атомов аргона в зависимости от доли примесных газов. При достижении доли, равной 2×10^{-4} , средняя концентрация возбужденных атомов аргона уменьшается в 2 раза. Полученные результаты демонстрируют необходимость применения инертных газов высокой степени очистки (99.999 % или 99.9999 %) и поддержания газовой системы в свободном от примесных газов состоянии.

Литература

1. Han J., Heaven M. C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // *Optics Letters*. 2012. Vol. 37. No. 11. Pp. 2157–2159.
2. Emmons D. J., Weeks D. E. Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 121. No. 20.
3. Han J., Glebov L., Venus G., Heaven M. C. Demonstration of diode-pumped metastable Ar laser // *Optics Letters*. 2013. Vol. 38. No. 24. Pp. 5458–5461.
4. Emmons D. J., Weeks D. E., Eshel B., and Perram G. P. Metastable Ar(1s5) density dependence on pressure and argon-helium mixture in a high-pressure radio frequency dielectric barrier discharge // *Journal of Applied Physics*. 2018. Vol. 123. No. 4.
5. Mikheyev P. A., Chernyshov A. K., Svistun M. I., Ufimtsev N. I., Kartamysheva O. S., Heaven M. C., and Azyazov V. N., Transversely optically pumped Ar:He laser with a pulsed-periodic discharge // *Opt Express*. 2019. Vol. 27.
6. Rawlins W. T., Hoskinson A. R., Galbally-Kinney K. L., Davis S. J., Hopwood J. A., Han J., and Heaven M. C. Kinetics of Metastable Argon Optical Excitation and Gain in Ar/He Microplasmas // *J Phys. Chem*. 2023. Vol. 123. No. 11.
7. Zhang Z., Lei P., Song Z., Sun P., Zuo D., Wang X. Optically pumped argon metastable laser with repetitively pulsed discharge in a closed chamber // *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 129. No. 14.
8. Lei P., Chen Z., Shen Y., Wang X., Zuo D. Demonstration of a metastable argon laser of 10 W by transverse pumping // *Opt. Lett*. 2024. Vol. 49.
9. Sanderson C. R., Ballmann C. W., Han J., Clark A. B., Hokr B. H., Xu K. G., and Heaven M. C. Demonstration of a quasi-CW diode-pumped metastable xenon laser // *Opt Express*. 2019. Vol. 27.
10. Mikheyev P. A., Han J., Clark A., Sanderson C., and Heaven M. C. Production of Ar and Xe metastables in rare gas mixtures in a dielectric barrier discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50. No. 48.
11. Demyanov A. V., Kochetov I. V., Mikheyev P. A., Azyazov V. N., and Heaven M. C. Kinetic analysis of rare gas metastable production and optically pumped Xe lasers // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 51. No. 4.
12. Юрьев А. В., Адаменков Ю. А., Горбунов М. А. и др. Одновременная генерация на трёх длинах волн в среде He–Kr–Ar с оптической накачкой // *Квантовая электроника*. 2024. № 54.

13. Юрьев А. В., Адаменков Ю. А., Горбунов М. А. и др. Генерация излучения на длине волны 893 нм на метастабильных атомах криптона с помощью оптической накачки // Успехи прикладной физики. Т. 12. № 6. 2024. С. 556–566.
14. Адаменков А. А., Адаменков Ю. А., Волков М. А., Выскубенко Б. А., Гаранин С. Г., Горбунов М. А., Домажиров А. П., Егорушин М. В., Калачева А. А., Колобянин Ю. В., Конкина Н. А., Стариков Ф. А., Хлебников А. А., Шайдулина В. А. Лазер на метастабильных атомах Ar^* с поперечной оптической накачкой мощностью 1 Вт // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 8. С.695–697.
15. Юрьев А. В., Горбунов М. А., Адаменков Ю. А., Калачева А. А., Шайдулина В. А., Кабак Е. В. Кинетические процессы аргоно-гелиевой плазмы импульсного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25, вып. 5.
<http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-5/articles/1118/>
16. Zhu X., and Pu Y. A simple collisional–radiative model for low-temperature argon discharges with pressure ranging from 1Pa to atmospheric pressure: kinetics of Paschen 1s and 2p levels // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43.
17. Dytko N. A., Ionikh Y. Z., Kochetov I. V. Experimental and theoretical study of the transition between diffuse and contracted forms of the glow discharge in argon // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 41. No. 5.
18. Emmons D. J. and Weeks D. E. Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge // Journal of applied physics. 2017. Vol. 121.
19. Stankov M., Becker M. M., Hoder T., and Lohagen D. Extended reaction kinetics model for non-thermal argon plasmas and its test against experimental data // Plasma Sources Science and Technology. 2022. Vol. 31.
20. Shiu S., Biondi M. Dissociative recombination in argon: Dependence of the total rate coefficient and excited-state production on electron temperature // Physical review A. 1977. Vol. 17. No. 3.
21. Zagidullin M. V., Mikheyev P. A. Numerical study of a nanosecond repetitively pulsed discharge in an Ar-He mixture at near atmospheric pressure // Physics of Plasmas. 2023. Vol. 30.
22. Shon J. W., Kushner M. J. Excitation mechanisms and gain modeling of the high-pressure atomic Ar laser in He/Ar mixtures // Journal of applied physics. 1994. Vol. 75.
23. Jones J. D., Listert D. G., Wareing D. P. The temperature dependence of the three-body reaction rate coefficient for some rare-gas atomic ion-atom reaction rate coefficient for some atomic ion-atom reactions in the range 100 ÷ 300 K // Department of Physics. 1979. Vol. 29.
24. Karelin A. V., Simakova O. V. Kinetics of the active medium of a multiwave He-Ar-Xe laser pumped by a hard ionizer // International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers. 2000. Proceedings Volume. No. 4071.
25. Karelin A. V., Simakova O. V. Kinetics of the active medium of a multiwave He-Ar-Xe laser pumped by a hard ioniser // Quantum Electron. 1999. Vol. 29.
26. Hoskinson A. R., Gregorio J., Hopwood J. Argon metastable production in argon-helium microplasmas // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119. No. 23.
27. Kannari F., Obara M., Fujioka T. An advanced kinetic model of electron-beam-excited KrF lasers including the vibrational relaxation in KrF(B) and collisional mixing of KrF(B,C) // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57.
28. Kuntner N. Modeling and Simulation of Electronic Excitation in Oxygen-Helium Discharges and Plasma-assisted Combustion // Institute of Combustion Technology for Aerospace Engineering University of Stuttgart, 2017.
29. Lazarou C., Anastassiou C. Numerical simulation of a capillary helium and helium-oxygen atmospheric pressure plasma jet: propagation dynamics and interaction with dielectric // Plasma Sources Science and Technology. 2018. Vol. 27.

30. Baeva M., Stankov M., Trautvetter T., Methling R. The effect of oxygen admixture on the properties of microwave generated plasma in Ar–O₂: a modelling study // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. Vol. 54.
31. Park G., Lee H., Kim G., Lee J. K. Global Model of He/O₂ and Ar/O₂ Atmospheric Pressure Glow Discharges // *Plasma Processes and Polymers*. 2008. Vol. 5.
32. Gudmundsson J. T., Kouznetsov I. G., Patel K. K., Lieberman M. A. Electronegativity of low-pressure high-density oxygen discharges // *Journal of Physics*. 2001. Vol. 34.
33. Иванов А. Н. Физико-химические процессы в кислород-аргоновой плазме. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2003, Иваново.
34. Debal F., Bretagne J. Analysis of DC magnetron discharges in Ar–N₂ gas mixtures. Comparison of a collisional-radiative model with optical emission spectroscopy // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1998. Vol. 7.
35. Bourdon A., Darny T. Numerical and experimental study of the dynamics of a helium plasma gun discharge with various amounts of N₂ admixture // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. Vol. 25.
36. Zhang Y., Shneider M. N. Femtosecond Laser Excitation in Argon–Nitrogen Mixtures // *AIAA Journal*, 2018. Vol. 56. No. 3.
37. Kang N., Gaboriau F. Modeling and experimental study of molecular nitrogen dissociation in an Ar–N₂ ICP discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2011, vol. 20.
38. Kutasi K., Guerra V., and Sa P. Theoretical insight into Ar–O₂ surface-wave microwave discharges // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. Vol. 43.
39. Rahman M. Z., Mynuddin M. Kinetic Modelling of Atmospheric Pressure Nitrogen Plasma // *American Journal of Modern Physics*. 2018. Vol. 7. No. 5.

References

1. Han J., Heaven M. C., Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms, *Optics Letters*, 2012, vol. 37, no. 11, pp 2157–2159. DOI:10.1364/OL.37.002157
2. Emmons D. J., Weeks D. E., Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge, *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 20, DOI: 10.1063/1.4983678
3. Han J., Glebov L., Venus G., Heaven M. C., Demonstration of diode-pumped metastable Ar laser, *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 24, pp 5458–5461. DOI: 10.1364/OL.38.005458.
4. Emmons D. J., Weeks D. E., Eshel B., and Perram G. P., Metastable Ar(1s₅) density dependence on pressure and argon-helium mixture in a high-pressure radio frequency dielectric barrier discharge, *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 4. DOI:10.1063/1.5009337
5. Mikheyev P. A., Chernyshov A. K., Svistun M. I., Ufimtsev N. I., Kartamysheva O. S., Heaven M. C., and Azyazov V. N., Transversely optically pumped Ar:He laser with a pulsed-periodic discharge, *Opt. Express*, 2019, vol. 27. DOI:10.1364/OE.383276
6. Rawlins W. T., Hoskinson A. R., Galbally-Kinney K. L., Davis S. J., Hopwood J. A., Han J., and Heaven M. C., Kinetics of Metastable Argon Optical Excitation and Gain in Ar/He Microplasmas, *J. Phys. Chem.*, 2023, vol. 123, no. 11. DOI: 10.1021/acs.jpca.3c00048
7. Zhang Z., Lei P., Song Z., Sun P., Zuo D., Wang X., Optically pumped argon metastable laser with repetitively pulsed discharge in a closed chamber, *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 14. DOI:10.1063/5.0041297
8. Lei P., Chen Z., Shen Y., Wang X., Zuo D., Demonstration of a metastable argon laser of 10 W by transverse pumping, *Opt. Lett.*, 2024, vol. 49. DOI:10.1364/OL.533007
9. Sanderson C. R., Ballmann C. W., Han J., Clark A.B., Hokr B. H., Xu K. G., and Heaven M. C., Demonstration of a quasi-CW diode-pumped metastable xenon laser, *Opt. Express*, 2019, vol. 27. DOI:10.1364/OE.27.036011

10. Mikheyev P. A., Han J., Clark A., Sanderson C., and Heaven M. C., Production of Ar and Xe metastables in rare gas mixtures in a dielectric barrier discharge, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 48. DOI:10.1088/1361-6463/aa91bf
11. Demyanov A. V., Kochetov I. V., Mikheyev P. A., Azyazov V. N., and Heaven M. C., Kinetic analysis of rare gas metastable production and optically pumped Xe lasers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, no. 4. DOI: 10.1088/1361-6463/aa9e40
12. Juriev A. V., Adamenkov Yu.A., Gorbunov M.A. et al., Simultaneous Generation at Three Wavelengths in an Optically Pumped He–Kr–Ar Medium, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51. DOI: 10.3103/S1068335624601493
13. Juriev A. V., Adamenkov Yu. A., Gorbunov M. A., et al., Generation of radiation at a wavelength of 893 nm on metastable krypton atoms using optical pumping, *Achievements of applied physics*, 2024, vol. 12, no. 6, pp. 556–566 [in Russian]. DOI:10.51368/2307-4469-2024-12-6-556-566
14. Adamenkov A. A., Adamenkov Yu. A., Volkov M. A., Vyskubenko B. A., Garanin S. G., Gorbunov M. A., Domazhirov A. P., Egorushin M. V., Kalacheva A. A., Kolobyanin Yu. V., Konkina N. A., Starikov F. A., Khlebnikov A. A., Shaidulina V. A., Laser on metastable Ar* atoms with transverse optical pumping with a power of 1 W, *Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 8, pp. 695–697 [in Russian]
15. Juriev A. V., Adamenkov Y. A., Gorbunov M. A., et al., Kinetic processes of argon-helium plasma of a pulsed discharge, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, iss. 5 [in Russian], <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-5/articles/1118/>
16. Zhu X. and Pu Y., A simple collisional–radiative model for low-temperature argon discharges with pressure ranging from 1Pa to atmospheric pressure: kinetics of Paschen 1s and 2p levels, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43. DOI: 10.1088/0022-3727/43/1/015204
17. Dytko N. A., Ionikh Y. Z., Kochetov I. V., Experimental and theoretical study of the transition between diffuse and contracted forms of the glow discharge in argon, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 5. DOI: 10.1088/0022-3727/41/5/055204
18. Emmons D. J. and Weeks D. E., Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge, *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121. DOI: 10.1063/1.4983678
19. Stankov M., Becker M. M., Hoder T., and Lohagen D., Extended reaction kinetics model for non-thermal argon plasmas and its test against experimental data, *Plasma Sources Science and Technology*, 2022, vol. 31. DOI: 10.1088/1361-6595/ac9332
20. Shiu S., Biondi M., Dissociative recombination in argon: Dependence of the total rate coefficient and excited-state production on electron temperature, *Physical Review A*, 1977, vol. 17, no. 3. DOI: 10.1103/PhysRevA.17.868
21. Zagidullin M. V., Mikheyev P. A., Numerical study of a nanosecond repetitively pulsed discharge in an Ar-He mixture at near atmospheric pressure, *Physics of Plasmas*, 2023, vol. 30. DOI: 10.1063/5.0170170
22. Shon J. W., Kushner M. J., Excitation mechanisms and gain modeling of the high-pressure atomic Ar laser in He/Ar mixtures, *Journal of applied physics*, 1994, vol. 75. DOI: 10.1063/1.356334
23. Jones J. D., Listert D. G., Wareing D. P., The temperature dependence of the three-body reaction rate coefficient for some rare-gas atomic ion-atom reaction rate coefficient for some atomic ion-atom reactions in the range 100 ÷ 300 K, *Department of Physics*, 1979, vol. 29.
24. Karelin A. V., Simakova O. V., Kinetics of the active medium of a multiwave He-Ar-Xe laser pumped by a hard ionizer, *International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers*, 2000, Proceedings Volume 4071.
25. Karelin A. V., Simakova O. V., Kinetics of the active medium of a multiwave He-Ar-Xe laser pumped by a hard ionizer, *Quantum Electron*, 1999, vol. 29. DOI: 10.1070/QE1999v029n08ABEH001552
26. Hoskinson A. R., Gregorio J., Hopwood J., Argon metastable production in argon-helium microplasmas, *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 23. DOI: 10.1063/1.4954077

27. Kannari F., Obara M., Fujioka T., An advanced kinetic model of electron-beam-excited KrF lasers including the vibrational relaxation in KrF(B) and collisional mixing of KrF(B,C), *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57. DOI: 10.1063/1.334590
28. Kuntner N., *Modeling and Simulation of Electronic Excitation in Oxygen-Helium Discharges and Plasma-assisted Combustion*, Institute of Combustion Technology for Aerospace Engineering University of Stuttgart, 2017.
29. Lazarou C., Anastassiou C., Numerical simulation of a capillary helium and helium-oxygen atmospheric pressure plasma jet: propagation dynamics and interaction with dielectric, *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, vol. 27. DOI:10.1088/1361-6595/aadeb8
30. Baeva M., Stankov M., Trautvetter T., Methling R., The effect of oxygen admixture on the properties of microwave generated plasma in Ar–O₂: a modelling study, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, vol. 54. DOI: 10.1088/1361-6463/ac08cc
31. Park G., Lee H., Kim G., Lee J. K., Global Model of He/O₂ and Ar/O₂ Atmospheric Pressure Glow Discharges, *Plasma Processes and Polymers*, 2008, vol. 5. DOI: 10.1002/ppap.200800019
32. Gudmundsson J. T., Kouznetsov I. G., Patel K. K., Lieberman M. A., Electronegativity of low-pressure high-density oxygen discharges, *Journal of Physics*, 2001, vol. 34. DOI: 10.1088/0022-3727/34/7/312
33. Ivanov A.N., *Physicochemical processes in oxygen-argon plasma*, Thesis, 2003, Ivanovo [in Russian].
34. Debal F., Bretagne J., Analysis of DC magnetron discharges in Ar–N₂ gas mixtures. Comparison of a collisional-radiative model with optical emission spectroscopy, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1998, vol. 7. DOI: 10.1088/0963-0252/7/2/016
35. Bourdon A., Darny T., Numerical and experimental study of the dynamics of a helium plasma gun discharge with various amounts of N₂ admixture, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2016, vol. 25. DOI: 10.1088/0963-0252/25/3/035002
36. Zhang Y., Shneider M. N., Femtosecond Laser Excitation in Argon–Nitrogen Mixtures, *AIAA Journal*, 2018, vol. 56, no. 3. DOI: 10.2514/1.J056084
37. Kang N., Gaboriau F., Modeling and experimental study of molecular nitrogen dissociation in an Ar–N₂ ICP discharge, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2011, vol. 20. DOI: 10.1088/0963-0252/20/4/045015
38. Kutasi K., Guerra V., and Sa P., Theoretical insight into Ar–O₂ surface-wave microwave discharges, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43. DOI: 10.1088/0022-3727/43/17/175201
39. Rahman M. Z., Mynuddin M., Kinetic Modelling of Atmospheric Pressure Nitrogen Plasma, *American Journal of Modern Physics*, 2018, vol. 7, no. 5. DOI: 10.11648/j.ajmp.20180705.13

Статья поступила в редакцию 5 августа 2025 г.