

# Исследование характеристик и параметров плазмы перенапряженного наносекундного разряда в криптоне между электродами из суперионного проводника – сульфида серебра

А. К. Шуайбов\*, А. И. Миня, Р. В. Грицак, А. Н. Малинин,  
А. А. Малинина, Р. М. Голомб, З. Т. Гомоки

ГВУЗ «Ужгородский национальный университет»,  
г. Ужгород, 88000, Украина

\*e-mail: [alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua](mailto:alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua)

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 17.05.2023

Принята к публикации 24.05.2023

Представлены результаты исследования электрических и оптических характеристик перенапряженного наносекундного разряда атмосферного давления между электродами из суперионного проводника ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) в криптоне. Разрушение электродов в разряде и внесение паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  в межэлектродный промежуток происходил за счет микровзрывов неоднородностей на рабочих поверхностях поликристаллических электродов (образование эктонов) с целью синтеза тонких пленок на основе данного соединения на поверхности диэлектрической подложки, которая устанавливалась вблизи электродов. Путем численного решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям, для плазмы парогазовых смесей на основе криптона и сульфида серебра рассчитаны: температура и плотность электронов в разряде, удельные потери мощности разряда на основные электронные процессы и константы скорости электронных процессов в зависимости от параметра  $E/N$ . На кварцевых подложках газоразрядным методом в условиях ультрафиолетового ассистирования плазмой разряда синтезированы и в определенной мере исследованы однородные тонкие пленки на основе сульфида серебра.

*Ключевые слова:* перенапряженный наносекундный разряд атмосферного давления, плазма, криптон, тонкие пленки, сульфид серебра, излучение

УДК 537.523.3

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.3.20>

## ВВЕДЕНИЕ

В [1] приведен обзор современного состояния разработок ионных источников на основе суперионных проводников (СИП) для аэрокосмических и ионно-лучевых технологий. Рассмотрены методы синтеза и свойства жестких электролитов, образование подвижных ионов, быстрый ионный транспорт в тонкой пленке электролита под действием внешнего электрического поля, а также процессы ионной эмиссии с поверхности электролита в вакуум. Приводятся также режимы работы, конструкция и технология изготовления анионных и катионных источников и проанализированы методы повышения эффективности их работы и основные области применения.

При химическом синтезе соединений серебра с атомами галогенов получают преимущественно макроскопические образцы в виде поликристаллов, хотя подавляющее количество их применений в силовой электронике (конденсаторы, аккумуляторы и т.п.) требуют образцов в форме

тонких пленок. Поэтому в настоящее время актуальным является поиск и оптимизация новых физических методов синтеза пленочных микро- и наноструктур на основе соединений серебра с халькогенами, типа  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{Ag}_2\text{Se}$  и т.д.

Применение перенапряженного наносекундного разряда между электродами из переходных металлов ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Al}$ , ...) в воздухе или в кислороде позволило синтезировать тонкие пленки на основе оксидов этих металлов [2, 3]. Аналогичные эксперименты с перенапряженным наносекундным разрядом между электродами из тройного халькопирита ( $\text{CuInSe}_2$ ) и электродом из алюминия и тройного халькопирита в различных газах атмосферного давления дали возможность синтезировать пленки  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuAlInSe}_2$  [4, 5]. В этих условиях реализуется эктонный механизм распыления материала электродов [6], при котором в сильном электрическом поле газового разряда происходят микровзрывы естественных острий на поверхностях электродов и внесение их материала в плазму.

Синтез тонких пленок из материала электродов возможен на подложке из диэлектрика, установленной у системы электродов. Если плазма подобных разрядов интенсивно излучает ультрафиолетовое излучение, то ассистирование синтеза пленок ультрафиолетом позволяет оказывать положительное воздействие на поверхностные наноструктуры, в частности уменьшая их сопротивление [7]. Плазма на основе серебра характеризуется интенсивными спектральными линиями Ag I, Ag II, поэтому перспективным может быть использование перенапряженного наносекундного разряда между электродами из сульфида серебра ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ).

Предыдущие наши эксперименты по синтезу тонких пленок на основе соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$  в среде инертных газов атмосферного давления показали, что при применении гелия и неона синтезируемая пленка очень неоднородна: в центре осаждается пленка из серебра, а вокруг нее из разных продуктов деструкции другие соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Возможной причиной разрушения исходного соединения материала электродов из  $\text{Ag}_2\text{S}$  или других подобных соединений в таком разряде может быть высокая энергия электронов разряда или высокая энергия метастабильных атомов  $\text{He}(m)$ ,  $\text{Ne}(m)$  в плазме на основе легких инертных газов. Поэтому в качестве буферного газа в данных экспериментах был выбран криптон.

В настоящее время условия синтеза тонких пленок на основе СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  с использованием наносекундного перенапряженного разряда между электродами из сульфида серебра в криптона атмосферного давления не установлены.

В статье приводятся результаты исследования электрических и спектральных характеристик перенапряженного наносекундного разряда в криптона атмосферного давления между поликристаллическими электродами из СИП ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), итоги моделирования параметров плазмы на смеси криптона с парами сульфида серебра, а также показатели спектров рамановского рассеяния лазерного излучения на длине волны 785 нм тонкими пленками, которые были синтезированы из продуктов эрозии электродов.

#### ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перенапряженный наносекундный разряд атмосферного давления в криптона между электродами из поликристаллического СИП на основе соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$  зажигался в разрядной камере, изготовленной из оргстекла. Ее устройство приведено в [8]. Массивные образцы поликристаллов на основе СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  были синтезированы в технологической лабора-

тории химического факультета ГВУЗ «Ужгородский национальный университет».

Зажигание перенапряженного наносекундного разряда происходило с помощью высоковольтного модулятора биполярных импульсов напряжения с общей продолжительностью 50–150 нс и суммарной амплитудой положительных и отрицательных составляющих  $\pm 20$ –60 кВ. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов построен по схеме с резонансной перезарядкой накопительного малоиндуктивного конденсатора емкостью 1540 пФ. Коммутатором в модуляторе служил водородный импульсный тиратрон ТГИИ-1000-25. Частота повторения импульсов напряжения могла варьировать в пределах 40–1000 Гц.

Импульсная электрическая мощность перенапряженного наносекундного разряда определялась графическим умножением осциллограмм импульсов напряжения и тока. Интегрирование по времени импульсной мощности позволяло получать энергию в одном электрическом импульсе, который вносился в плазму.

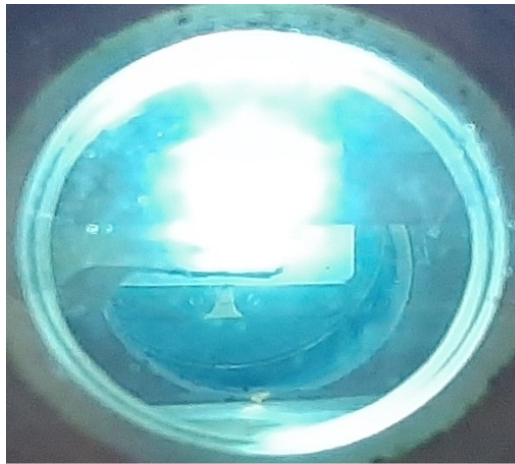
Перенапряженный наносекундный разряд зажигался при расстоянии между электродами 2 мм. Рабочие торцевые части электродов имели радиусы округления порядка 10 мм. Диаметр цилиндрических электродов составлял 5 мм.

Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке и осциллограммы импульсов тока регистрировались с помощью широкополосного емкостного делителя напряжения, пояса Роговского и широкополосного осциллографа БЛОП-04. Временное разрешение этой системы измерения характеристик электрических импульсов составляло 2–3 нс.

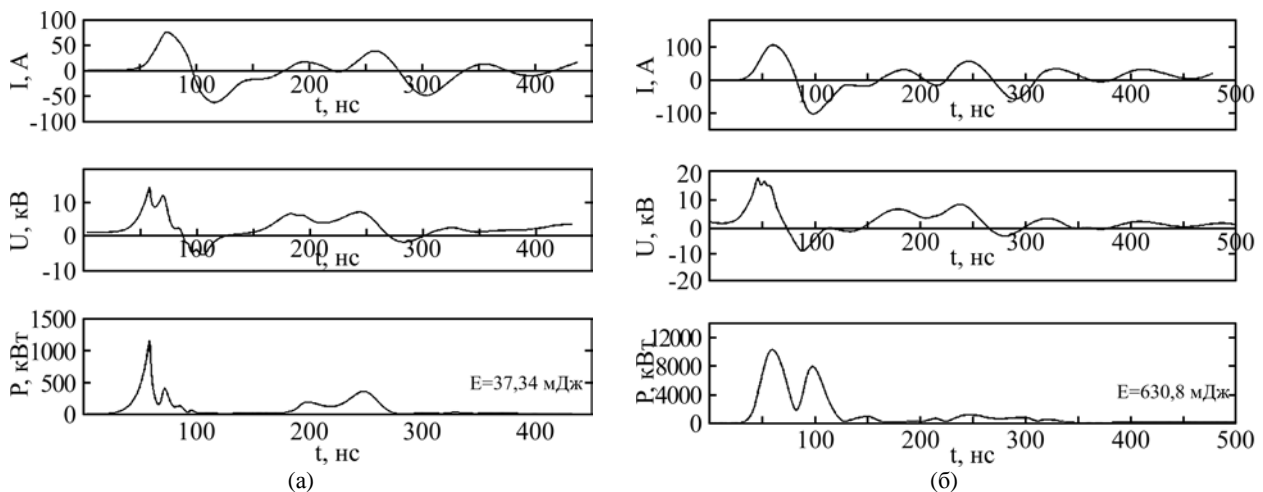
Для регистрации спектров излучения плазмы использовался цифровой двухканальный спектрометр с компенсацией астigmatизма SL-40-2-1024USB. Рабочий спектр спектрометра: 200–1200 нм.

Более подробно техника эксперимента описана в [8].

Наносекундный разряд зажигался при перенапряжении разрядного промежутка, когда в нем формируется пучок убегающих электронов [9]. Под действием этого пучка, сопутствующего рентгеновского излучения и примеси из легко ионизирующегося материала (соединение  $\text{Ag}_2\text{S}$ ) разряд в криптона атмосферного давления даже при весьма неоднородном распределении напряженности электрического поля между электродами с радиусами округления полусферических рабочих поверхностей (рис. 1) был достаточно однородным. В сильном электрическом поле на



**Рис. 1.** Фотография перенапряженного наносекундного разряда между поликристаллическими электродами из соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$  в криптоне при  $p = 101$  кПа и  $f = 1$  кГц.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока  $I$ , напряжения  $U$  и импульсная мощность  $P$  перенапряженного наносекундного разряда в криптоне при давлении  $p = 101$  кПа, расстоянии между электродами  $d = 2$  мм и  $f = 1$  кГц и величине зарядного напряжения рабочего конденсатора высоковольтного модулятора  $U = 13$  (а) и  $20$  (б) кВ.

рабочей поверхности электрода на основе СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  происходят микровзрывы нановискеров [7], что способствовало внесению паров СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  и продуктов их распада ( $\text{Ag}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{S}\dots$ ) в плазму и дальнейшему их осаждению на стеклянной подложке в виде тонкой пленки.

При установке кварцевой подложки на расстоянии 2–4 см от центра разрядного промежутка и времени горения разряда 30 минут на подложке фиксировалось осаждение тонкой пленки из продуктов распыления материала электродов.

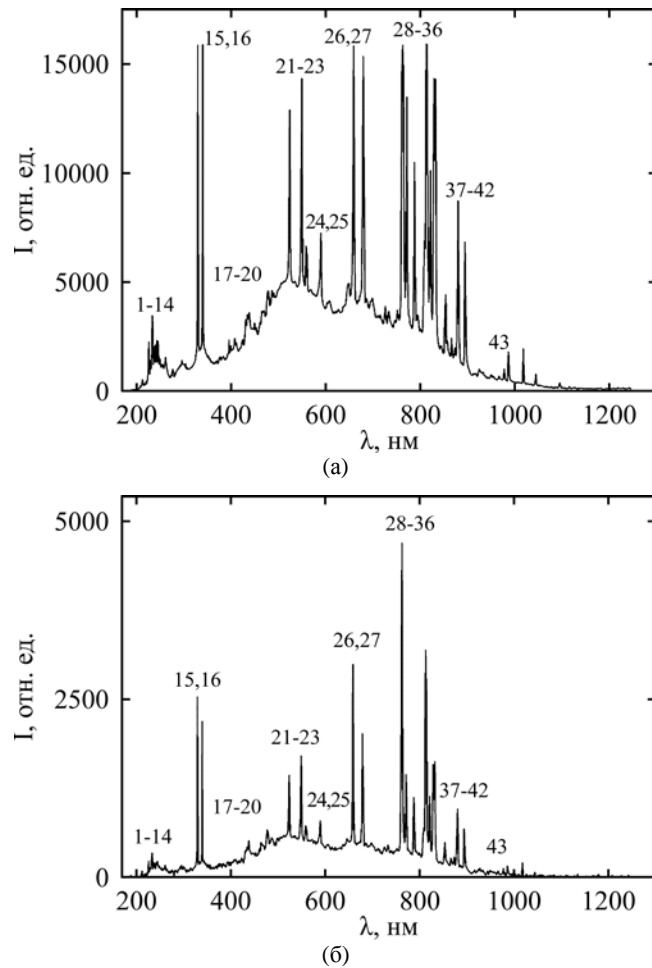
Фотографии разряда получали с использованием цифровой фотокамеры (время экспозиции  $\approx 1$  с). Фотографии поверхности тонкой пленки воспроизводили с помощью оптического микроскопа и фотокамеры, при увеличении системы – 1500.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА И СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПЛЕНОК

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов тока, напряжения, импульсной

мощности перенапряженного наносекундного разряда между электродами из соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$  в криптоне и энергетический вклад в плазму за один импульс.

В данном эксперименте полная длительность импульсов напряжения достигала 400–450 нс, а сам импульс напряжения состоял из затухающих во времени осцилляций длительностью около 40–50 нс. Максимальная величина спада напряжения на разрядном промежутке составляла 20–27 кВ, учитывая положительную и отрицательную составляющие амплитуды импульса напряжения. Максимальная амплитуда импульса тока – 150–250 А. Наибольшая величина импульсной мощности разряда достигалась в первые 100 нс с момента его зажигания и составляла около 10 МВт (при  $t = 50$ –70 нс). Второй максимум импульсной мощности равнялся 8 МВт и наблюдался в момент времени от начала зажигания разряда  $t = 70$ –100 нс. Энергия отдельного электрического импульса при увеличении зарядного напряжения от 13 до 20 кВ возрастала с 37,3 до 630,8 мДж.



**Рис. 3.** Спектры излучения перенапряженного наносекундного разряда между электродами из СИП в криптоне ( $p = 101$  кПа) при частоте  $f = 1$  (а) и  $0,08$  (б) кГц.

**Таблица 1.** Результаты идентификации наиболее интенсивных спектральных линий излучения компонент смеси  $\text{Ag}_2\text{S-Kr}$  плазмы перенапряженного наносекундного разряда при давлении  $p = 101$  кПа, расстоянии между электродами  $d = 2$  мм, величине зарядного напряжения  $U = 20$  кВ и частоте повторения импульсов  $f = 1$  кГц. (Энергии нижнего  $E_{\text{нижн}}$  и верхнего  $E_{\text{верх}}$  уровней с термами  $\text{Терм}_{\text{нижн}}$  и  $\text{Терм}_{\text{верх}}$ )

№	$\lambda_{\text{табл}}$ , нм	$I_{\text{эксп}}$ отн. ед.	Объект	$E_{\text{нижн}}$ , эВ	$E_{\text{верх}}$ , эВ	$\text{Терм}_{\text{нижн}}$	$\text{Терм}_{\text{верх}}$
1	211,38	517	Ag II	4,85	10,71	$4d^9(^2D_{5/2})5s^2[^5/2]_3$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^5/2]_3$
2	224,64	2248	Ag II	4,85	10,37	$4d^9(^2D_{5/2})5s^2[^5/2]_3$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^7/2]_4$
3	227,99	1142	Ag II	5,70	11,05	$4d^9(^2D_{3/2})5s^2[^3/2]_2$	$4d^9(^2D_{3/2})5p^2[^5/2]_3$
4	232,02	2680	Ag II	5,05	10,36	$4d^9(^2D_{5/2})5s^2[^5/2]_2$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^3/2]_1$
5	233,13	3458	Ag II	5,05	10,36	$4d^9(^2D_{5/2})5s^2[^5/2]_2$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^3/2]_1$
6	241,13	1313	Ag II	5,42	10,56	$4d^9(^2D_{3/2})5s^2[^3/2]_1$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^3/2]_2$
7	243,77	2320	Ag II	4,85	9,94	$4d^9(^2D_{5/2})5s^2[^5/2]_3$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^3/2]_2$
8	244,78	2292	Ag II	5,70	10,77	$4d^9(^2D_{3/2})5s^2[^3/2]_2$	$4d^9(^2D_{3/2})5p^2[^3/2]_2$
9	260,59	1298	Ag II	10,18	14,94	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^7/2]_3$	$4d^9(^2D_{5/2})6s^2[^3/2]_3$
10	261,43	1542	Ag II	10,77	15,51	$4d^9(^2D_{3/2})5p^2[^5/2]_2$	$4d^9(^2D_{3/2})6s^2[^3/2]_1$
11	266,04	769	Ag II	12,14	16,78	$4d^85s^2^3F_3$	$4d^8(^3F)5s5p(^3P)^5G_2$
12	271,17	715	Ag II	10,37	14,94	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^7/2]_4$	$4d^9(^2D_{5/2})6s^2[^5/2]_3$
13	276,75	1008	Ag II	5,70	10,18	$4d^9(^2D_{3/2})5s^2[^3/2]_2$	$4d^9(^2D_{5/2})5p^2[^7/2]_3$
14	293,83	1291	Ag II	10,77	14,99	$4d^9(^2D_{3/2})5p^2[^5/2]_2$	$4d^9(^2D_{5/2})6s^2[^5/2]_2$
15	328,06	15867	Ag I	0,00	3,77	$4d^{10}5s^2S_{1/2}$	$4d^{10}5p^2P_{3/2}$
16	338,28	15887	Ag I	0,00	3,66	$4d^{10}5s^2S_{1/2}$	$4d^{10}5p^2P_{1/2}$
17	405,54	2146	Ag I	3,66	6,72	$4d^{10}5p^2P_{1/2}^{\circ}$	$4d^{10}6d^2D_{3/2}$
18	424,06	2349	Ag II	14,08	17,00	$4d^85s^2^1G_4$	$4d^9(^2D_{3/2})6p^2[^5/2]_3$
19	435,54	3295	Kr II	13,98	16,83	$4s^24p^4(^3P)5s^4P_{5/2}$	$4s^24p^4(^3P)5p^4D_{7/2}$
20	490,24	4502	S II	15,55	18,08	$3s^23p^2(^3P)4p^2S_{1/2}^{\circ}$	$3s3p^4^2P_{1/2}$
21	520,90	12889	Ag I	3,66	6,04	$4d^{10}5p^2P_{1/2}^{\circ}$	$4d^{10}5d^2D_{3/2}$

22	531,24	5001	Ag II	15,70	18,03	$4d^9(^2D_{5/2})5d^2[{}^9/2]_4$	$4d^9(^2D_{5/2})4f^2[{}^9/2]_4$
23	547,86	14339	Ag II	15,71	17,97	$4d^9(^2D_{5/2})5d^2[{}^3/2]_2$	$4d^9(^2D_{5/2})4f^2[1/2]_1$
24	557,02	6639	Kr I	9,91	12,14	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5p^2[{}^1/2]_1$
25	587,09	7243	Kr I	10,03	12,14	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5p^2[{}^3/2]_2$
26	657,07 – 328,06 (2)	15841	Ag I	0,00	3,77	$4d^{10}5s^2S_{1/2}$	$4d^{10}5p^2P^{\circ}_{3/2}$
27	679,2 – 338,28 (2)	15341	Ag I	0,00	3,66	$4d^{10}5s^2S_{1/2}$	$4d^{10}5p^2P^{\circ}_{1/2}$
28	760,15	15861	Kr I	9,91	11,54	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^3/2]_2$
29	769,45	13488	Kr I	9,91	11,52	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^3/2]_1$
30	785,48	10490	Kr I	10,56	12,14	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5s^2[{}^1/2]_0$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5p^2[{}^1/2]_1$
31	800,51	2855	Ag II	14,94	16,49	$4d^9(^2D_{5/2})6s^2[{}^5/2]_3$	$4d^9(^2D_{5/2})6p^2[{}^5/2]_3$
32	810,43	15915	Kr I	9,91	11,44	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^3/2]_2$
33	819,00	10110	Kr I	10,03	11,54	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^3/2]_2$
34	826,32	14340	Kr I	10,64	12,14	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5s^2[{}^1/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5p^2[{}^3/2]_2$
35	829,81	14317	Kr I	10,03	11,52	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[3/2]_1$
36	841,24	2064	Kr I	11,54	13,01	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5d^2[{}^3/2]_2$
37	850,88	3177	Kr I	10,64	12,10	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5s^2[1/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{1/2})5p^2[3/2]_1$
38	869,47	1680	S I	7,86	9,29	$3s^23p^3(^4S)4p^5P_3$	$3s^23p^3(^4S)4d^5D^{\circ}_4$
39	877,67	8719	Kr I	10,03	11,44	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[5/2]_2$
40	892,86	6841	Kr I	9,91	11,30	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[1/2]_1$
41	942,19	605	S I	8,40	9,72	$3s^23p^3(^2D)4s^3D^{\circ}_2$	$3s^23p^3(^2D)4p^3F_3$
42	964,95	680	S I	8,41	9,69	$3s^23p^3(^2D)4s^3D^{\circ}_3$	$3s^23p^3(^2D)4p^3D_3$
43	975,17	1008	Kr I	10,03	11,30	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5s^2[{}^3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P^{\circ}_{3/2})5p^2[{}^1/2]_1$

Спектр излучения плазмы перенапряженного наносекундного разряда в криптоне на основе СИП и результаты идентификации наиболее интенсивных спектральных линий атомов серы, серебра, криптона и однозарядных ионов серы и серебра в разряде приведены на рис. 3 и в табл. 1.

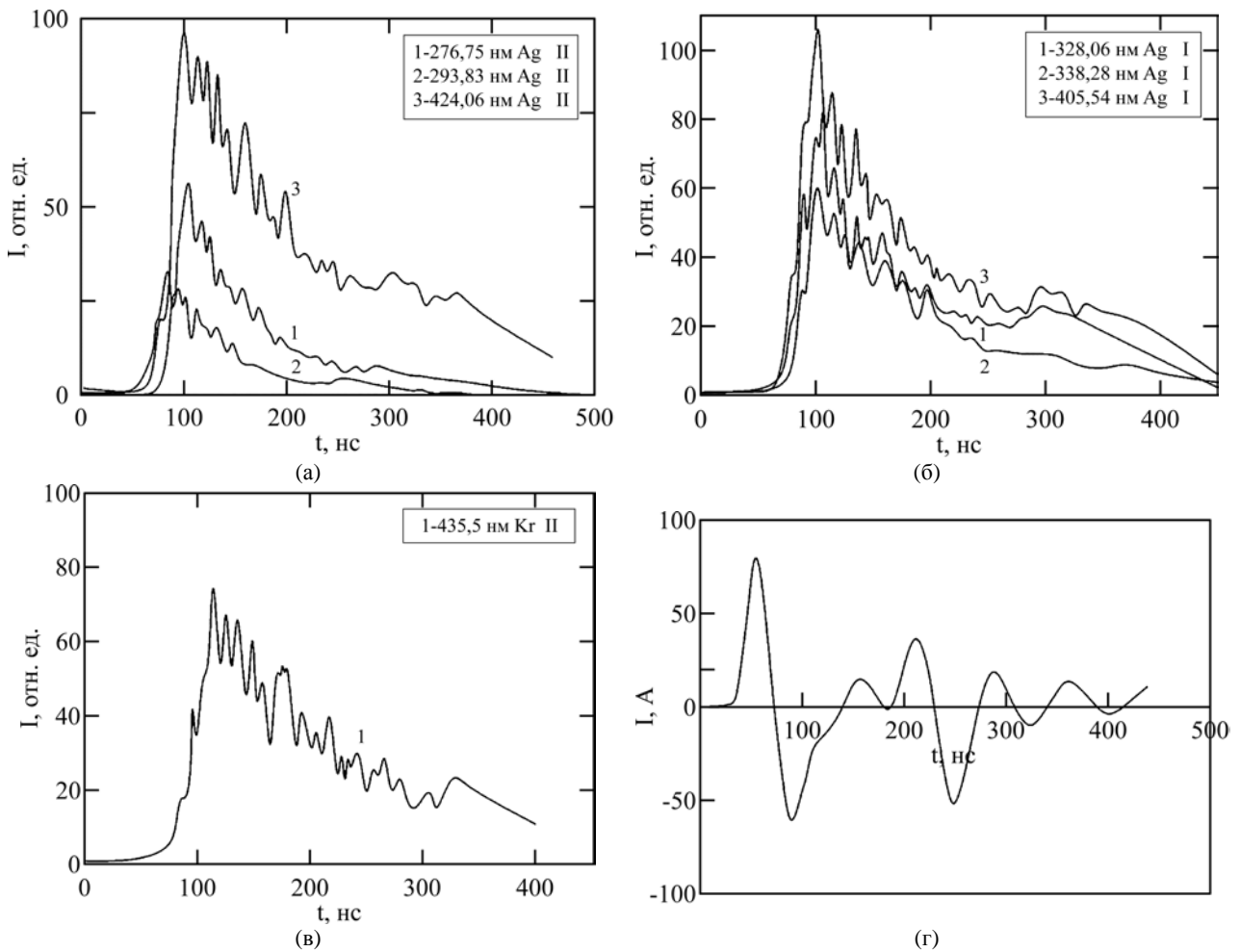
Снижение интенсивности спектральных линий серебра при уменьшении частоты следования разрядных импульсов обусловлено уменьшением концентрации материала электродов и продуктов его распада в плазме разряда. Можно также отметить, что уменьшение частоты в 12,5 раза приводит к различному уменьшению интенсивности разных линий. Возможно, это свидетельствует о сложном характере процессов образования компонент, условий их возбуждения и излучения.

При идентификации спектральных линий спектра излучения разрядной плазмы использовались справочники [10, 11]. Как следует из табл. 1, исследованная плазма интенсивно излучает в спектральном диапазоне 200–340 нм. Основными источниками излучения в коротковолновом спектральном диапазоне 200–300 нм были однозарядные ионы серебра, а в спектральном интервале 300–340 нм – атомы серебра.

Динамика излучения плазмы основных возбужденных составляющих приведена в табл. 2.

Максимум разрядного тока величиной 82 А достигался в момент времени 52 нс.

Как видно из рис. 4, большая часть излучения атомов и ионов наблюдалась в послесвечении разряда, то есть после достижения максимума тока.



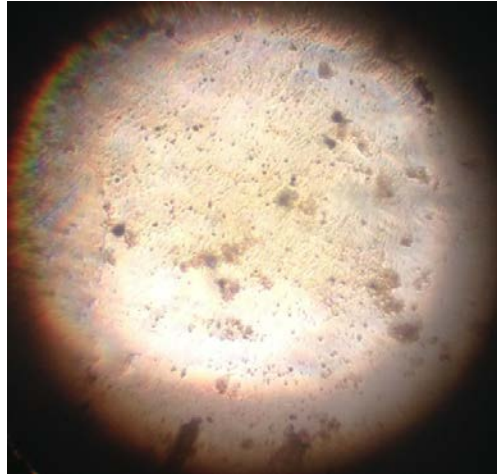
**Рис. 4.** Осциллограммы излучения наиболее интенсивных спектральных линий Ag II, Ag I, Kr II (а–в) и осциллограмма тока перенапряженного наносекундного разряда между электродами из  $\text{Ag}_2\text{S}$  (г) при межэлектродном расстоянии 2 мм и атмосферном давлении криптона.

**Таблица 2.** Излучения наиболее интенсивных спектральных линий Ag II, Ag I, Kr II

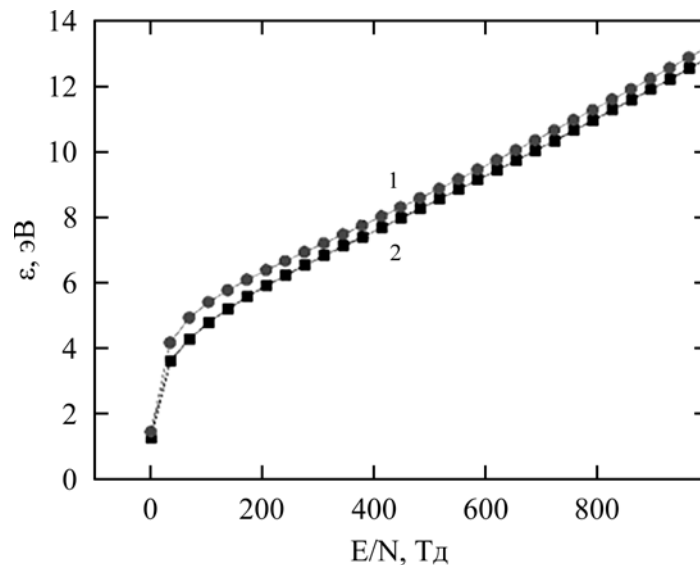
$\lambda_{\text{табл.}}$ , нм	Объект	Максимальная интенсивность свечения, отн. ед.	Момент времени свечения, нс
276,75	Ag II	64	106
293,83	Ag II	37	85
424,06	Ag II	110	101
328,06	Ag I	94	106
338,28	Ag I	70	102
405,54	Ag I	111	103
435,5	Kr II	90	113

В мощных импульсных разрядах атмосферного давления с плотностью электронов порядка  $10^{15}–10^{17}\text{см}^{-3}$  образование возбужденных ионов металлов происходит преимущественно в процессах их возбуждения электронами, как это характерно для атомов меди и алюминия [8]. Подобные эффекты в поведении интенсивности спектральных линий серебра наблюдались и в наносекундном перенапряженном разряде между электродами из  $\text{Ag}_2\text{S}$  в воздухе атмосферного давления [12].

Фотографии поверхности образованных тонких пленок на основе соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$  (рис. 5), полученных с использованием оптического микроскопа, показали, что они достаточно однородны. На них наблюдались лишь отдельные неоднородности с размерами порядка в несколько микрометров, которые могут быть обусловлены разрушением поликристаллических электродов в перенапряженном наносекундном разряде. Для улучшения однородности синтезированных пленок и сокра-



**Рис. 5.** Фотография участка поверхности тонкой пленки, синтезированной из продуктов деструкции поликристаллических электродов на основе СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  в перенапряженном наносекундном разряде в криптона при давлении 101 кПа и частоте 1 кГц.



**Рис. 6.** Зависимости средней энергии электронов в плазме парогазовой смеси от  $E/N$ : 1 –  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200$ : 101300 Па; 2 –  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000$ : 101300 при общем давлении  $p = 101500$  Па (1) и 102300 Па (2).

щения времени их синтеза необходимо ослабление энергии в электрическом импульсе, которое может быть достигнуто уменьшением длительности энергетического вклада в плазму и увеличением частоты следования импульсов.

#### ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ

Параметры плазмы разряда для смесей паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона при атмосферном давлении (соотношение компонент 200 Па: 101,3 кПа и 1000 Па: 101,3 кПа) определялись численно и рассчитывались как полные интегралы функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в разряде. ФРЭЭ находились численно путем решения кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении. Расчеты ФРЭЭ проводились с использованием программы [13]. На основе полученных ФРЭЭ для электронов определены: средние энергии, температуры, скорости дрейфа, концентрации, константы скоростей возбуждения уровней атомов серебра. Это позволило определить: удельные потери

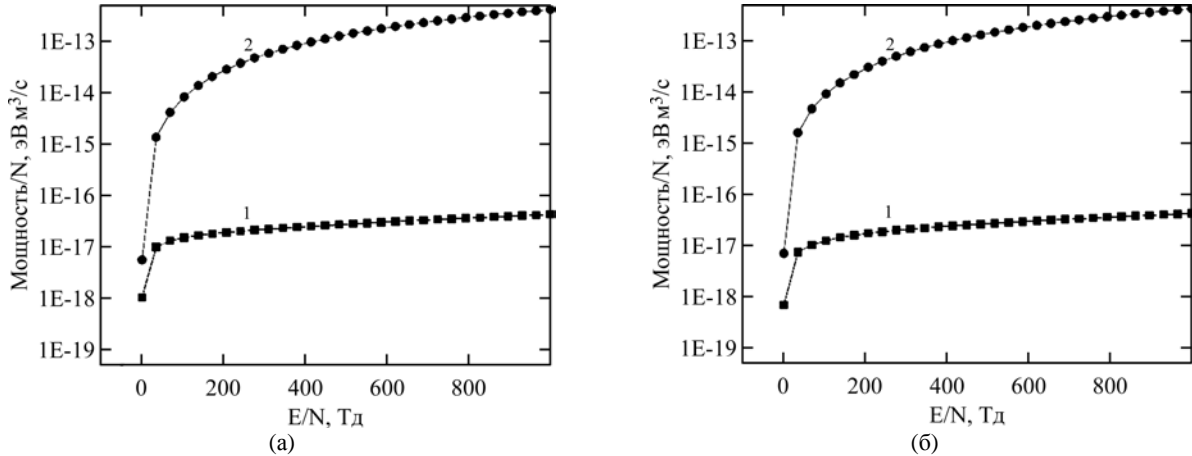
разряда на упругие и неупругие процессы столкновений электронов с атомами и ионами обеих смесей в зависимости от величины приведенного электрического поля (отношения напряженности электрического поля  $E$  к общей концентрации  $N$  смеси из атомов криптона и молекул  $\text{Ag}_2\text{S} - E/N$ ). Диапазон изменений параметра составлял  $E/N = 1-1000$  Тд ( $1 \times 10^{-17} - 1 \times 10^{-14}$  В·см<sup>2</sup>) и включал величины  $E/N$ , которые были реализованы в эксперименте. Эти величины электрического поля были 306 и 102 Тд, а также 304 и 101 Тд для времен 50–100 нс импульсов напряжения (рис. 2) от начала горения разряда. В интеграле столкновений электронов с атомами и молекулами учтены следующие процессы: упругое рассеяние электронов на атомах серебра, возбуждение уровней атомов и ионов серебра (энергии порогов 6,01 эВ, 3,78 эВ, 3,66 эВ, 7,19 эВ, 7,02 эВ, 6,71 эВ, 5,99 эВ и 17 эВ), ионизация атомов серебра (энергия порога 8,00 эВ); упругое

**Таблица 3.** Транспортные характеристики электронов для смесей:  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200 \text{ Па} - 101300 \text{ Па}$  (I) и  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000 \text{ Па} - 101300 \text{ Па}$  (II)

$\tau$ , нс	$E/N$ , Тд	Смесь: I = 200 – 101300 Па			
		$\epsilon$ , эВ	$T$ , К	$V_{др.}$ , м/с	$N_{e^{\cdot}}$ , $\text{м}^{-3}$
50	306	7,213	83 671	$2,2 \times 10^5$	$7,2 \times 10^{19}$
100	102	5,409	62 744	$8,2 \times 10^4$	$3,89 \times 10^{20}$

$\tau$ , нс	$E/N$ , Тд	Смесь: II = 1000 – 101300 Па			
		$\epsilon$ , эВ	$T$ , К	$V_{др.}$ , м/с	$N_{e^{\cdot}}$ , $\text{м}^{-3}$
50	304	6,832	62 744	$2,2 \times 10^5$	$7,2 \times 10^{19}$
100	101	4,789	55 552	$8,8 \times 10^4$	$3,6 \times 10^{20}$



**Рис. 7.** Зависимости удельной мощности разряда, расходуемой на упругие (1) и неупругие (2) процессы на единицу общей концентрации, от  $E/N$  для смесей:  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200: 101300 \text{ Па}$  (а),  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000: 101300 \text{ Па}$  (б).

**Таблица 4.** Упругие и неупругие потери удельной мощности для смесей  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$

Удельная мощность потерь ( $\text{эВ м}^3/\text{с}$ ) в процессах столкновений с электронами		
Смесь I = 200–101300 Па		
$E/N$ , Тд	Упругие ( $10^{-16}$ )	Неупругие ( $10^{-14}$ )
306	0,2226	5,935
102	0,1519	0,8370
Смесь II = 1000–101300 Па		
$E/N$ , Тд	Упругие, ( $10^{-16}$ )	Неупругие, ( $10^{-14}$ )
304	0,2089	6,220
101	0,1246	0,9295

рассеяние электронов на атомах криптона, возбуждение уровней атомов криптона (энергии порога 9,91 эВ, 10,03 эВ, 10,56 эВ, 10,64 эВ, 11,30 эВ), ионизация атомов криптона (энергия порога 14,00 эВ).

Данные по абсолютным величинам эффективных сечений этих процессов, а также их зависимостей от энергий электронов взяты из базы данных статей [14, 15].

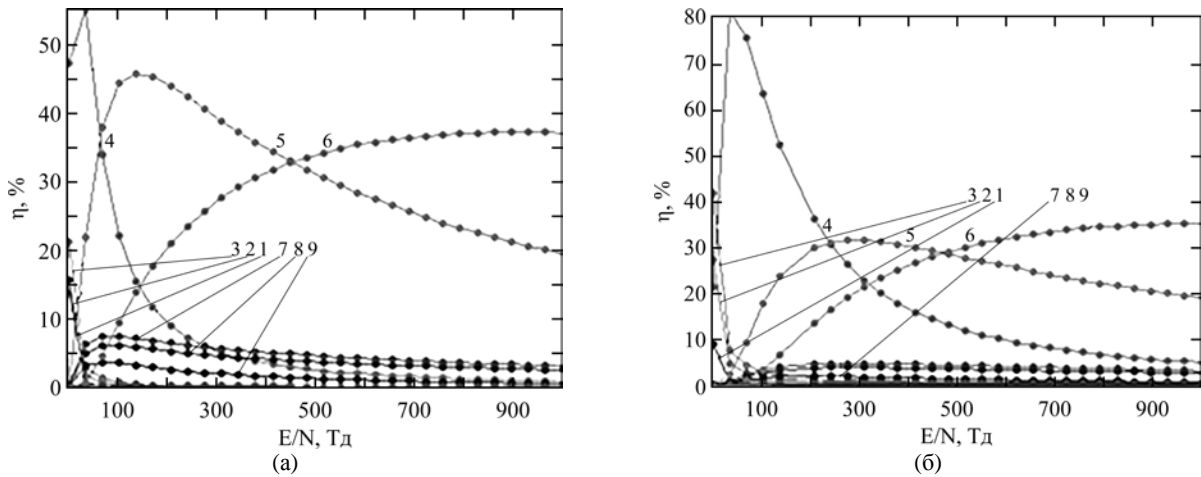
На рис. 6 представлены зависимости средней энергии электронов в плазме парогазовой смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200: 101300 \text{ Па}$  (I) и  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000: 101300 \text{ Па}$  (II) от  $E/N$  при общем давлении  $p = 101500 \text{ Па}$  и  $102300 \text{ Па}$  соответственно.

Средняя энергия электронов разряда для парогазовых смесей сульфид серебра–криптон почти линейно увеличивается от 1,454 эВ до 13,21 эВ (рис. 6) (кривая 1) и от 1,257 до 12,87 (кривая 2)

при возрастании  $E/N$  от 1 до 1000 Тд. При этом наблюдалась закономерность увеличенной скорости ее изменения в диапазоне 1–50 Тд для первой и второй смесей. Для диапазона  $E/N$  101–306 Тд, при котором проводились экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик разряда, средние энергии электронов изменялись в пределах 5,409–7,213 эВ для смеси с меньшим парциальным давлением паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  (рис. 6, кривая 1) и 4,789–6,832 для смеси с их большим парциальным давлением (рис. 6, кривая 2).

В табл. 3 приведены результаты расчета транспортных характеристик электронов: средние энергии  $\epsilon$ , температура  $T$ , скорость дрейфа  $V_{др.}$  и концентрация электронов для двух смесей паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  с криптоном.





**Рис. 8.** Зависимость удельных потерь мощности разряда, расходуемых на процессы столкновений электронов с атомами серебра и криптона от  $E/N$  в плазме для смесей  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200:101300 \text{ Па}$  (а) и  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000:101300 \text{ Па}$  (б): 1 – упругое рассеяние электронов на атомах криптона; 2 – возбуждение уровня атома серебра ( $E_{\text{пор}} = 3,66 \text{ эВ}$ ,  $\lambda = 338,289 \text{ нм}$ ); 3 – возбуждение уровня атомов серебра ( $E_{\text{пор}} = 3,78 \text{ эВ}$ ,  $\lambda = 328,068 \text{ нм}$ ); 4 – суммарное неупругое рассеяние (возбуждение и ионизация) электронов на атомах серебра; 5 – возбуждение уровня атомов криптона ( $E_{\text{пор}} = 11,30 \text{ эВ}$ ,  $\lambda = 892,86 \text{ нм}$ ); 6 – ионизация атомов криптона ( $E_{\text{пор}} = 14,00 \text{ эВ}$ ); 7 – возбуждение уровня атомов криптона ( $E_{\text{пор}} = 10,03 \text{ эВ}$ ); 8 – возбуждение уровня атомов криптона ( $E_{\text{пор}} = 10,64 \text{ эВ}$ ); 9 – возбуждение уровня атомов криптона ( $E_{\text{пор}} = 11,30 \text{ эВ}$ ,  $\lambda = 975,17 \text{ нм}$ ).

Температура и скорости дрейфа электронов (табл. 2) уменьшаются от 83 671К до 62 744К и от  $2,2 \times 10^5 \text{ м/с}$  до  $8,2 \times 10^4 \text{ м/с}$  для первой смеси, а от 62 744 К до 55 552 К и  $2,2 \times 10^5$  до  $8,8 \times 10^4$  для второй смеси при изменении  $E/N$  от 306 до 101 Тд соответственно. Значения концентрации электронов увеличиваются от  $7,2 \times 10^{19}$  до  $3,89 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  для первой смеси и от  $7,2 \times 10^{19}$  до  $3,6 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  для второй.

На рис. 7 приведена зависимость удельных мощностей потерь разряда при упругих и неупругих процессах столкновений электронов с компонентами смеси в газоразрядной плазме от  $E/N$ . Наблюдается увеличение мощности при возрастании значений  $E/N$  как для упругих процессов, так и для неупругих. Кроме того, отмечаются более высокие значения удельных мощностей потерь разряда для упругих (в смеси I = 200: 101300 Па) и неупругих процессов столкновений электронов с компонентами смесей (в смеси II = 1000: 101300 Па (рис. 7; табл. 4)).

Удельные потери мощности разряда в смесях  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}=200-101300 \text{ Па}$  (рис. 8а) и  $\text{Kr}-\text{Ag}_2\text{S} = 101300:1000 \text{ Па}$  (рис. 8б) при неупругих процессах столкновений электронов с атомами серебра (рис. 7, кривая 2) достигали значения 82% для второй смеси (рис. 7б) и 55% для первой (рис. 7а) при  $E/N = 35 \text{ Тд}$ . Для смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 1000-101300 \text{ Па}$  (рис. 7б) они были больше, чем для смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr} = 200-101300 \text{ Па}$  (рис. 7а) примерно в 2 раза. При возбуждении линии атомов серебра с длиной волны  $\lambda = 328,068 \text{ нм}$  (рис. 7б, кривая 3 при  $E/N = 1 \text{ Тд}$ ) они достигали значения 42%. Скорость роста и спада потерь мощности разряда на процессы возбуждения электронных состояний и

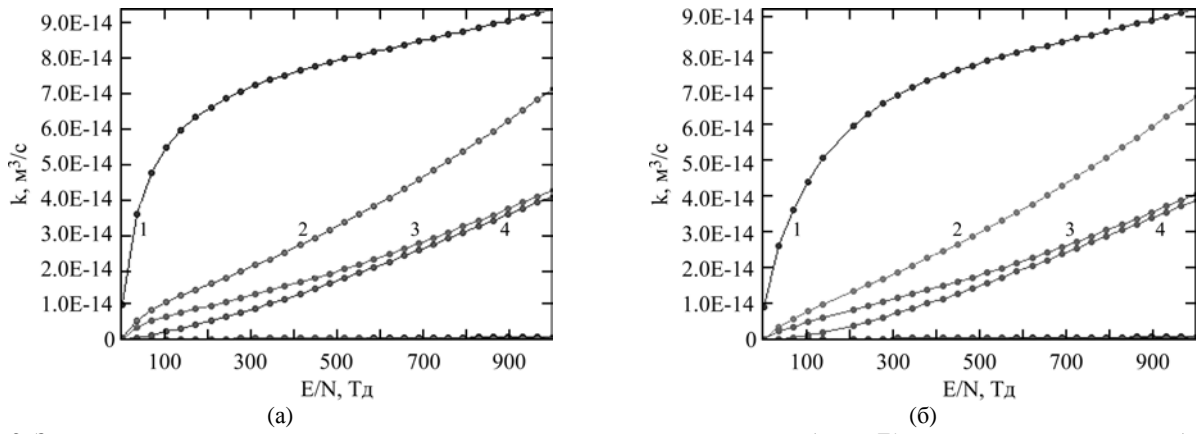
ионизацию и их значение связаны с характером зависимости эффективных сечений неупругих процессов столкновений электронов с составляющими рабочей среды от энергии электронов, их абсолютных величин, а также с зависимостью функции распределения электронов от  $E/N$  и пороговых энергий процессов [16].

На рис. 9 и в табл. 5 представлены результаты численного расчета зависимости констант скоростей возбуждения спектральных линий атомов серебра от  $E/N$  в смесях паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона для соотношения парциальных давлений в смесях 200–101300 Па (рис. 9а) и 1000–101300 (рис. 9б).

Константы скорости возбуждения характеризуются высоким значением, что связано с величиной абсолютных эффективных сечений соответствующих процессов [16]. В диапазоне  $E/N$  306 – 101 Тд, при котором проводились экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик разряда, они находились в пределах величин  $k \approx 0,6 \times 10^{-20} - 0,2 \times 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$  [17]. Максимальная величина константы скорости возбуждения резонансной спектральной линии  $\lambda = 328,06 \text{ нм}$  атомов серебра была  $0,2098 \times 10^{-13}$  для  $E/N$ , равной 306 Тд.

#### ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

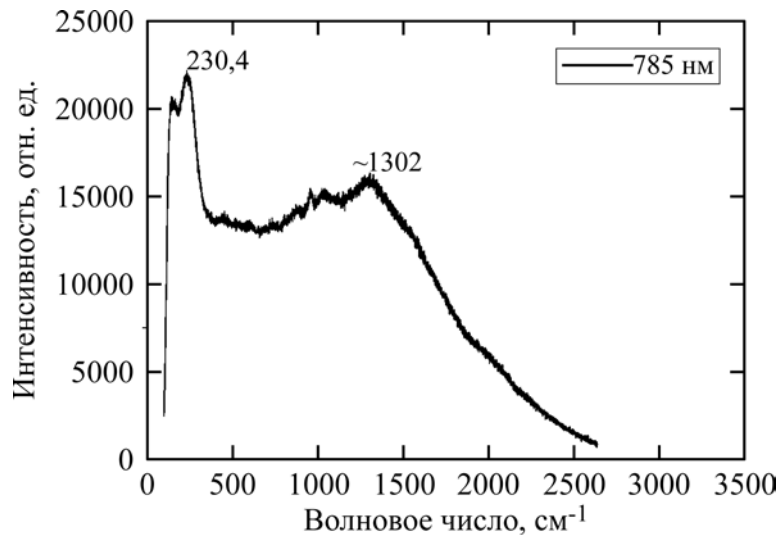
При установке подложки из стекла на расстоянии 2–4 см от центра разрядного промежутка и при частотах следования импульсов 500–1000 Гц были синтезированы достаточно однородные тонкие пленки из продуктов эрозии электродов перенапряженного наносекундного разряда в тяжелых инертных газах (Kr, Ar). Оптические



**Рис. 9.** Зависимости констант скоростей столкновений электронов с атомами серебра от  $E/N$  в плазме на смеси паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона 200–101300 Па (а) и 1000–101300 (б): 1 – упругое рассеяние электронов на атомах серебра; 2 – возбуждение состояния атома ( $E_{\text{пор}} = 3,78$  эВ); 3 – возбуждение состояния ( $E_{\text{пор}} = 3,66$  эВ); 4 – ионизация атомов ( $E_{\text{пор}} = 8,00$  эВ).

**Таблица 5.** Константы скоростей возбуждения ряда спектральных линий атомов серебра для значений  $E/N$  в плазме на смеси паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона: 200–101400 Па и 1000–101300 Па

$E/N$ , Тд	Смесь: $\text{Ag}_2\text{S}$ – $\text{Kr} = 101300:200$ Па					
306	Ag	$\lambda$ , нм	328,06	338,28	405,54	424,06
		$k$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$0,2098 \times 10^{-13}$	$0,1267 \times 10^{-13}$	$0,1683 \times 10^{-16}$	$0,1658 \times 10^{-17}$
102	Ag	$\lambda$ , нм	328,068	338,289	405,54	424,06
		$k$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$0,1048 \times 10^{-13}$	$0,6400 \times 10^{-14}$	$0,5882 \times 10^{-17}$	$0,1758 \times 10^{-19}$
$E/N$ , Тд	Смесь: $\text{Ag}_2\text{S}$ – $\text{Kr} = 101300:1000$ Па					
304	Ag	$\lambda$ , нм	328,068	338,289	405,54	424,06
		$k$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$0,1873 \times 10^{-19}$	$0,1133 \times 10^{-13}$	$0,1447 \times 10^{-16}$	$0,1255 \times 10^{-17}$
101	Ag	$\lambda$ , нм	328,068	338,289	405,54	424,06
		$k$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$0,7639 \times 10^{-14}$	$0,4694 \times 10^{-14}$	$0,3527 \times 10^{-17}$	$0,5871 \times 10^{-20}$



**Рис. 10.** Спектр рамановского рассеяния лазерного излучения на длине волны 785 нм тонкой пленкой, синтезированной из продуктов эрозии электродов перенапряженного наносекундного разряда между электродами из СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  ( $p(\text{Ar}) = 101$  кПа).

характеристики пленок, которые синтезировались в криптоне или аргоне были практически одинаковыми. Давление инертных газов составляло 101 кПа. В процессе синтеза пленок они все время находились под действием ультрафиолетового излучения плазмы разряда.

На рис. 10 приведен характерный спектр рамановского рассеяния излучения полупроводникового лазера с длиной волны генерации

785 нм. Зондирование синтезированной пленки методом микрорамановской спектроскопии на этой длине волны позволяло получать наиболее интенсивные спектры рамановского рассеяния по сравнению с зондированием на длинах волн 532 и 632,8 нм. Лазерный луч зондировал участок поверхности пленки диаметром 1–2 мкм. Средняя мощность лазера, который генерировал излучение на этой длине волны, составляла

32 мВт. Идентификация спектров рамановского рассеяния проводилась на основе работ [18, 19]. Для исследования тонких пленок применялся рамановский спектрометр марки Renishaw InVia™ confocal Raman microscope (UK). Время экспозиции составляло 10 секунд.

Спектр рамановского рассеяния света полученной пленки (рис. 10) характеризовался полосами в диапазонах  $100\text{--}300\text{ см}^{-1}$ , с максимумами при  $230,4\text{ см}^{-1}$ ,  $\sim 1000\text{ см}^{-1}$  и  $1302\text{ см}^{-1}$ . Полоса в интервале  $210\text{--}250\text{ см}^{-1}$ , в том числе максимум при  $230,4\text{ см}^{-1}$ , вызваны наночастицами  $\text{Ag}_2\text{S}$  и обязаны симметричным продольным колебательным модам связей  $\text{Ag-S-Ag}$  [18]. Широкая полоса в диапазоне  $1200\text{--}1300\text{ см}^{-1}$  связана с колебаниями серебра, которое выделяется при фотоиндуцированном разложении  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Наблюдаемая широкая полоса в диапазоне  $1500\text{--}1650\text{ см}^{-1}$  также связана с продуктами фотораспада  $\text{Ag}_2\text{S}$  [20].

### ВЫВОДЫ

Исследование характеристик перенапряженного наносекундного разряда в криптона между электродами из СИП  $\text{Ag}_2\text{S}$  выявило следующее:

- при расстоянии между электродами 2 мм зажегся пространственно-однородный разряд, форма которого определялась энергетическим вкладом в плазму и частотой повторения импульсов;

- максимальное напряжение на разрядном промежутке достигало 27 кВ при его полной продолжительности до 450 нс, а отдельные осцилляции на импульсе напряжения имели продолжительность 20–30 нс; максимальная амплитуда импульсов тока составляла 250 А, величина импульсной электрической мощности достигала 10 МВт при энергии в отдельном импульсе 631 мДж;

- в спектре излучения плазмы разряда преобладало излучение однозарядных ионов серебра в спектральном диапазоне 200–300 нм и атомов серебра в спектральном интервале 300–340 нм, что перспективно для разработки точечной УФ-лампы на парах соединения  $\text{Ag}_2\text{S}$ ;

- исследование синтезированных поверхностных структур на основе  $\text{Ag}_2\text{S}$ , из которого были изготовлены электроды разряда, показало, что они достаточно однородны.

Численное моделирование параметров плазмы в смеси паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона установило, что для диапазона  $E/N$  306–101 Тд, при котором проводились экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик разряда, средние энергии электронов изменялись в пределах 7,213–4,789 эВ. Их наибольшие

энергии соответствовали величинам 73,51–33,78 эВ для первой смеси и 77,12–30,31 эВ для второй смеси. Значения концентрации электронов составляли для смеси  $\text{Kr} - \text{Ag}_2\text{S}$ :  $7,2 \times 10^{19} - 3,89 \times 10^{20}\text{ см}^{-3}$  при 101300:200 Па и  $7,2 \times 10^{19} - 3,6 \times 10^{20}\text{ см}^{-3}$  при 101300:1000 Па.

Удельная мощность потерь разряда при неупругих и упругих процессах столкновений электронов с атомами и молекулами, которые входили в состав рабочих смесей газоразрядной плазмы, на единицу общей концентрации смеси увеличивалась с возрастанием величины  $E/N$  как для неупругих, так и для упругих процессов. Максимальное значение ее было для неупругих процессов в смеси паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  и криптона 1000–103000 Па и составляло величину  $0,6220 \times 10^{-13}\text{ эВ м}^3/\text{с}$  для  $E/N$  306 Тд.

Удельные потери мощности разряда в смесях  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$  = 200–101300 Па и  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$  = 1000–101300 Па при неупругих процессах столкновений электронов с атомами серебра достигали значения 82% для второй смеси и 55% для первой при  $E/N$  = 35 Тд. Для смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$  = 1000–101300 Па они были больше, чем для смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$  = 200–101300 Па примерно в 2 раза. При возбуждении линии атомов серебра с длиной волны  $\lambda = 328,068\text{ нм}$  при  $E/N = 1\text{ Тд}$  они составили 42%.

Константы скоростей возбуждения спектральных линий 328,068, 338,289 и 405,54 нм атомов серебра в смеси  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Kr}$  = 200–101300 Па находятся в пределах величин  $(0,5427\text{--}0,2132) \times 10^{-13}\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(0,3247\text{--}0,1286) \times 10^{-13}\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(0,5730\text{--}0,1789) \times 10^{-16}\text{ м}^3/\text{с}$  соответственно. Они имели большие значения, чем для смеси с большим парциальным давлением  $\text{Ag}_2\text{S}$  (1000 Па). Константа скорости возбуждения спектральной линии 424,06 нм иона серебра находится в пределах величин  $(0,2535 \times 10^{-16} - 0,2568 \times 10^{-17})\text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальное значение константы скорости возбуждения резонансной спектральной линии 328,068 нм атомов серебра составило величину  $(0,2098 \times 10^{-13})\text{ м}^3/\text{с}$  для  $E/N$  306 Тд для смеси паров  $\text{Ag}_2\text{S}$  с криптоном при значениях парциальных давлений 200 и 101300 Па соответственно.

Исследование рамановских спектров тонких пленок, синтезированных из плазмы на основе газопаровой смеси «криптон–сульфид серебра» показало, что они состоят из  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Это может быть использовано для разработок разных устройств на основе суперионной проводимости (суперконденсаторы, аккумуляторы высокой емкости и другие электротехнические приборы).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛІТЕРАТУРА

- Tolstoguzov, A.B., Belykh, S.F., Gololobov, G.P., Gurov, V.S., et al., Ion-beam sources based on solid electrolytes for aerospace applications and ion-beam technologies (Review), *Instrum. Exp. Techn.*, 2018, vol. 61, p. 159. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441218020100>.
- Shuaibov, A.K., Minya, A.Y., Malinina, A.A., Malinin, A.N., et al., Study into synchronous flows of bactericidal ultraviolet radiation and transition oxides metals (Zn, Cu, Fe) in a pulsed gas discharge overvoltage reactor nanosecond discharge in the air, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 4, p. 510. doi: <https://doi.org/10.3103/S106837552004016X>
- Shuaibov, O.K., Minya, O.Y., Malinina, A.O., Malinin, O.M., et al., Electroluminescence of aluminium-oxides nanoparticles in overstressed nanosecond discharge plasma in high-pressure air, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2021, vol. 19, no. 1, p. 189.
- Shuaibov, A.K., Minya, A.Y., Hrytsak, R.V., Malinina, A.A., et al., Characteristics of an overstressed discharge of nanosecond duration between electrodes of chalcopyrite in high pressure nitrogen, *Adv. Nanosci. Nanotechnol.*, 2020, vol. 4, no. 1, p. 1. doi: <https://doi.org/10.33140/ANN.04.01.01>
- Шуаибов, А.К., Миня, А.Й., Малинина, А.А., Грицак, Р.В., и др., Характеристики и параметры плазмы перенапряженного наносекундного разряда в воздухе между электродом из алюминия и электродом из халько-пирита (CuInSe<sub>2</sub>), *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 5, с. 34. doi: <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.5.34>
- Tominaga, K., Umezū, N., Mori, I., Ushiro, T., et al., Effects of UV light irradiation and excess Zn addition on ZnO:Al film properties in sputtering process, *Thin Solid Films*, 1998, vol. 316, p. 85. doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)00394-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)00394-0)
- Mesyats, G.A., Ecton or electron avalanche from metal, *Physics-Usppekhi*, 1995, vol. 165, no. 6, p. 601. doi: <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>
- Shuaibov, O.K. and Malinina, A.O., Overstressed nanosecond discharge in the gases at atmospheric pressure and its application for the synthesis of nanostructures based on transition metals, *Progr. Phys. Metals*, 2021, vol. 22, no. 3, p. 382. doi: <https://doi.org/10.15407/ufm.22.03.382>
- Tarasenko, V.F., *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge*. New York: Nova Science Publishers Inc., 2014, 578 p.
- Striganov, A.R. and Sventitskii, N.S., *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms*, New York: Springer, 1968, 899 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6610-3>
- NIST Atomic Spectra Database Lines Form [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
- Шуаибов, О.К., Грицак, Р.В., Романець, Р.П., Емісійні характеристики плазми наносекундного розряду в повітрі між електродами з суперіонного провідника (Ag<sub>2</sub>S), *The III Int. Scientific and Practical Conf. «Modern challenges to science and practice»*, January 24 – 26, 2022, Varna, Bulgaria. p. 483.
- <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr>.
- Smirnov, Yu.M., Electron-impact excitation of triplet levels of the zinc atom, *Opt. Spectrosc.*, 2008, vol. 104, no. 2, p. 159. doi: <https://doi.org/10.1134/S0030400X08020021>
- Dhanraj Gupta, Rahla Nagma and Bobby Antony, Electron impact total and ionization cross sections for Sr, Y, Ru, Pd, and Ag atoms, *Canad. J. Phys.*, 2013, vol. 91, no. 9, p. 744. doi: <https://doi.org/10.1139/cjp-2013-0174>
- Smirnov, Yu.M., Excitation of CuII and AgII in electron – atom collisions, *Quantum Electron.*, 1999, vol. 29, p. 1006. doi: <https://doi.org/10.1070/QE1999v029n11ABEH001624>
- Raizer, Yu.P., *Gas Discharge Physics*, Berlin: Springer-Verlag, 1991. 449 p.
- Malinina, A.O., Shuaibov, O.K., Malinin, O.M. and Bilak, Yu.Yu., Parameters of pulsed gas-discharge plasma based on gas-vapor mixture "krypton – silver sulfide", Jubilee conference "30 years of the Institute of Electronic Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine", 21–23 September, 2022, Uzhhorod, p. 142.
- Martina, I., Wiesinger, R., Jembrih-Simburger, D. and Schreiner, M., Micro-Raman characterisation of silver corrosion products: instrumental set up and reference database, *e-PS*, 2012, vol. 9, p. 1.
- Sadovnikov, S.I., Vovkotrub, E.G. and Rempel, A.A., Micro-Raman spectroscopy of nanostructured silver sulfide, *Dokl. Phys. Chem.*, 2018, vol. 480, p. 81. doi: <https://doi.org/10.1134/S0012501618060027>

## Summary

The results of a study of the electrical and optical characteristics of an overvoltage nanosecond atmospheric pressure discharge between electrodes made of a superionic conductor (Ag<sub>2</sub>S) in krypton are presented. The destruction of electrodes in the discharge and the introduction of Ag<sub>2</sub>S vapor into the interelectrode gap occurred due to microexplosions of inhomogeneities on the working surfaces of polycrystalline electrodes (the formation of ectons) in order to synthesize thin films based on this compound on the surface of a dielectric substrate which was installed near the electrodes. By numerically solving the Boltzmann kinetic equation for the electron energy distribution function, the temperature and the electron density in the discharge, the specific discharge power losses for the main electronic processes, and the rate constants of the electronic processes depending on the parameter E/N for the plasma of vapor-gas mixtures based on krypton and silver sulfide have been calculated. Homogeneous thin films based on silver sulfide were synthesized on the quartz substrates by the gas-discharge method under conditions of ultraviolet assisted discharge plasma.

**Keywords:** overvoltage nanosecond atmospheric pressure discharge, plasma, krypton, thin films, silver sulfide, radiation