

# Газоразрядный точечный источник УФ-излучения на основе газопаровой смеси аргона и меди

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

«Ужгородский национальный университет»,  
г. Ужгород, 88000, Украина  
\*e-mail: [alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua](mailto:alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua)

Поступила в редакцию 23.02.2022

После доработки 15.07.2022

Принята к публикации 19.07.2022

Приведены характеристики импульсно-периодического источника дальнего ультрафиолетового (УФ) излучения с накачкой перенапряженным биполярным разрядом наносекундной длительности между медными электродами в аргоне в условиях атмосферного давления. Пары меди вносились в разряд за счет эктонного механизма. Исследованы характеристики перенапряженного наносекундного разряда при расстоянии между электродами 2 мм. Изучены спектры излучения разряда и проведена оптимизация интенсивности УФ-излучения точечного излучателя в зависимости от напряжения питания высоковольтного модулятора и частоты следования разрядных импульсов. Исследование спектральных характеристик плазмы на основе газопаровых смесей медь–аргон показало, что наиболее интенсивными были резонансные спектральные линии атома и иона меди. Установлено, что между электродами из меди при межэлектродном расстоянии 2 мм зажигался однородный в пространстве перенапряженный наносекундный разряд. Выявлено, что максимальное значение средней мощности УФ-излучения при  $p(\text{Ar}) = 101$  кПа наблюдалось в диапазоне УФ-А.

*Ключевые слова:* перенапряженный биполярный разряд наносекундной продолжительности, плазма, аргон, медь, излучение

УДК 537.523.3

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.4.81>

## ВВЕДЕНИЕ

Для разработки импульсно-периодических источников ультрафиолетового (УФ) излучения значительный интерес представляет канальная стадия искрового разряда в инертных газах высокого давления, поскольку она имеет высокую интенсивность излучения в диапазоне длин волн 200–250 нм [1]. Однако для исследования короткоимпульсных разрядов ( $\tau = 50$ –150 нс) в газах с эктонным механизмом внесения паров материала электродов [2] важна оптимизация режимов работы устройства на канальной стадии развития разряда.

Ранние исследования искрового разряда высокого давления [3] показали, что средняя плотность газа в его плазменном канале на поздних стадиях составляла  $\approx 5 \times 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>, а это соответствовало концентрации плазменной среды на уровне  $\approx 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Средняя температура плазмы в канале достигала  $40 \times 10^4$  К [4].

Результаты исследования униполярного наносекундного разряда между медными электродами при расстоянии между электродами  $d = 1$ –2 мм в воздухе в условиях атмосферного давления указывают на наличие интенсивных спектральных линий Cu I, Cu II в диапазоне длин

волн 200–230 нм. Для равномерного использования материала электродов в последующих наших исследованиях был осуществлен переход к биполярному наносекундному разряду в газах при атмосферном давлении [5–7].

Так, в [5] было установлено, что подобный разряд выступает источником наноструктур оксидов меди, которые можно осаждать на твердой подложке, установленной у разряда. В [6] было показано, что такой разряд в воздухе в условиях атмосферного давления является источником потоков УФ-излучения атомов, ионов меди, а также наночастиц оксида меди, которые могут использоваться в медицине, биологии и биомедицинской инженерии. Для получения потока наноструктур чистой меди вместе с потоком УФ-излучения перспективным может быть исследование характеристик биполярного наносекундного разряда между медными электродами в аргоне.

В [7] приведены результаты исследования характеристик перенапряженного биполярного разряда атмосферного давления между электродами из алюминия продолжительностью  $\tau = 50$ –400 нс, где было обнаружено достаточно интенсивное излучение малых наночастиц оксида

алюминия и УФ-излучения атомов и ионов алюминия.

Результаты экспериментальных исследований характеристик искрового канала в аргоне при атмосферном давлении между электродами из алюминия как в магнитном поле, так и без него приведены в [8]. В [9] представлены результаты систематических исследований влияния продольного магнитного поля на основные характеристики искрового разряда в аргоне в условиях атмосферного давления с примесями паров алюминия, которые вносились в плазму при формировании эктонов на поверхности электродов. Показано, что магнитное поле смещает максимум спектральной плотности излучения в УФ-диапазон спектра, снижает скорость расширения канала искры и потери на поперечное излучение, увеличивает удельную электрическую мощность разряда, проводимость и температуру плазмы на его дуговой стадии.

Результаты исследования характеристик точечного УФ-излучателя с накачкой перенапряженным биполярным разрядом газопаровой смеси аргон–медь при атмосферном давлении в известной нам литературе отсутствуют, поэтому актуальна задача оптимизации такого источника УФ-излучения для применений в медицине, биологии, биомедицинской инженерии.

В статье приводятся результаты исследования пространственных, электрических и оптических характеристик перенапряженного наносекундного биполярного разряда атмосферного давления в аргоне с примесью паров меди, которые вносились в плазму за счет формирования эктонов на рабочих поверхностях медных электродов в сильном электрическом поле.

#### ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование параметров перенапряженного наносекундного разряда проводилось на разрядном модуле, схема которого приведена в [1, 5, 6]. Перенапряженный наносекундный разряд между электродами из меди зажигался в герметизированной камере из оргстекла при расстоянии между медными электродами  $d = 2$  мм и давлении аргона 6,7; 101 кПа. Экспериментальная установка содержала разрядный модуль, систему регистрации оптического излучения на основе монохроматора МДР-2 и систему регистрации импульсных электрических и оптических характеристик. Для зажигания разряда на электроды разрядной ячейки подавались биполярные импульсы высокого напряжения продолжительностью 50–150 нс амплитудой  $\pm(20\text{--}40)$  кВ. Частота повторения импульсов напряжения была выбрана равной 40–150 Гц. Осциллограммы импульсов напряжения и

импульсов тока регистрировались с помощью широкополосного емкостного делителя напряжения, пояса Роговского с временным разделением на уровне 2–3 нс.

Между кончиками медных электродов зажигался однородный разряд продолжительностью 100–400 нс с амплитудой импульсов тока 50–200 А и объемом плазмы 10–500 мм<sup>3</sup>. При межэлектродном расстоянии 2 мм разрядный промежуток был перенапряжен, что создавало благоприятные условия для формирования пучка убегающих электронов высокой энергии и сопутствующего рентгеновского излучения [10, 11].

Измерение мощности излучения плазмы разряда осуществлялось при помощи ультрафиолетового измерителя абсолютной мощности излучения «ТКА-ПКМ», позволяющего вести измерения в спектральном диапазоне 200–400 нм.

Воздух в разрядной камере откачивался форвакуумным насосом до остаточного давления 10 Па. Диаметр медных цилиндрических электродов 5 мм, а радиус закругления их рабочей торцевой поверхности был одинаковым и равным 3 мм. Объем разряда зависел от частоты следования импульсов напряжения. Режим «точечного разряда» достигался только при частотах повторения импульсов напряжения в диапазоне  $f = 40\text{--}150$  Гц. При кратковременном увеличении частоты до 1000 Гц объем плазмы газоразрядного излучателя возрос до 120–150 мм<sup>3</sup>.

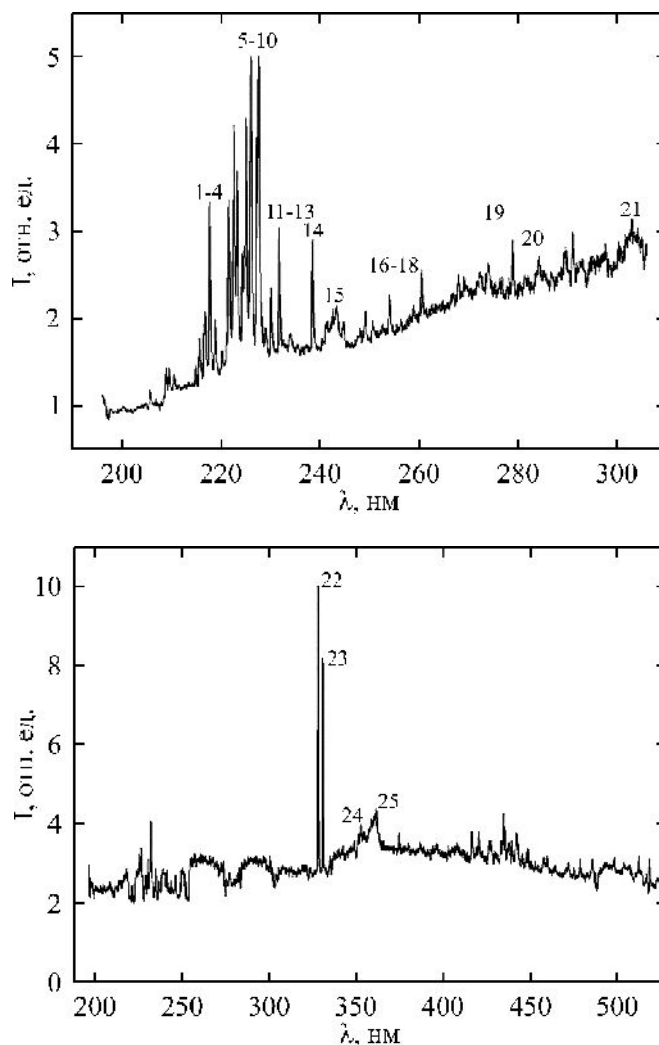
#### ХАРАКТЕРИСТИКИ УФ-ИЗЛУЧАТЕЛЯ

На рис. 1 приведены усредненные по времени фотографии перенапряженного наносекундного разряда при давлениях  $p(\text{Ar}) = 7,6; 101$  кПа, полученные с временной экспозицией фотокамеры  $\approx 1$  сек. При давлении аргона 6,7 кПа перенапряженный наносекундный разряд имел вид яркой центральной части диаметром около 2 мм, что равнялось межэлектродному расстоянию, из которого вытекали две струи плазмы зеленого цвета. При повышении давления аргона до 101 кПа увеличивался диаметр яркой центральной части в 2–3 раза.

Осциллограммы напряжения и тока были в форме затухающих во времени осцилляций, что обусловлено несогласованностью выходного сопротивления высоковольтного модулятора с сопротивлением нагрузке. Полная продолжительность осцилляций напряжения на промежутке и разрядного тока достигала 450 нс при длительности отдельных осцилляций напряжения 7–10 нс, а осцилляции тока имели продолжительность  $\approx 70$  нс. Для разряда в аргоне в условиях атмосферного давления при  $d = 2$  мм амплитуда



**Рис. 1.** Фотографии перенапряженного наносекундного разряда между медными электродами в аргоне при:  $p(\text{Ar}) = 6,7$  (а) и  $101$  (б) кПа для  $d = 2$  мм.



**Рис. 2.** Участки спектра излучения наносекундного разряда в аргоне между медными электродами при  $d = 2$  мм и  $p(\text{Ar}) = 101$  кПа.

наибольшего спада напряжения на электродах достигалась в начальной стадии разряда и составляла  $\approx \pm 7-8$  кВ, тока  $\pm 100$  А, а импульсной мощности – 1,2 МВт, что обеспечивало энергетический вклад за один разрядный импульс в плазму около  $\approx 167$  мДж.

На [рис. 2](#) приведены участки спектра излучения наносекундного высоковольтного разряда между медными электродами в аргоне ( $p(\text{Ar}) = 101$  кПа) при расстоянии между электродами  $d = 2$  мм, а результаты его идентификации сведены в [таблицу](#).

Результаты расшифровки спектра излучения плазмы наносекундного разряда между медными электродами, приведенные на [рис. 2](#).

Особенностью этих спектров излучения является наличие континуума, на фоне которого наблюдались все спектральные линии и полосы. Природа данного континуума в условиях наших исследований связана с тепловым и рекомбинационным излучением плазмы. Форма континуума с широким максимумом при 400–450 нм хорошо коррелировала с результатами, известными из литературы.

Таблица

№	$\lambda_{\text{табл.}}$ нм	$I_{\text{эксп}}$ отн.ед.	Объект	$E_{\text{нижн.}}$ эВ	$E_{\text{верх.}}$ эВ	Конфигурация и терм нижнего уровня	Конфигурация и терм верх- него уровня
1	214,89	1,78	Cu II	1,39	7,18	$3d^8 4s^2 \ ^2D$	$3d^9 5f \ ^2F^o$
2	216,50	2,07	Cu I	0,00	5,72	$3d^{10} 4s \ ^2S$	$4p' \ ^2D^o$
3	217,49	3,34	Cu II	8,92	14,61	$4p \ ^1F^o$	$4d \ ^1G$
4	220,05	1,63	Cu II	9,06	14,70	$4p \ ^3D^o$	$4d \ ^3F$
5	221,02	3,34	Cu II	3,26	8,86	$4s \ ^1D$	$4p \ ^3D^o$
6	221,45	4,21	Cu I	1,39	6,98	$4s^2 \ ^2D$	$4p'' \ ^2P^o$
7	223,84	3,69	Cu I	1,64	7,18	$4s^2 \ ^2D$	$5f \ ^2F^o$
8	224,70	4,30	Cu II	2,72	8,23	$4s \ ^3D$	$4p \ ^3P^o$
9	226,30	5,00	Cu I	1,64	7,12	$4s^2 \ ^2D$	$7p \ ^2P^o$
10	227,62	5,05	Cu II	2,98	8,42	$4s \ ^3D$	$4p \ ^3P^o$
11	229,43	1,89	Cu II	2,83	8,23	$4s \ ^3D$	$4p \ ^3P^o$
12	230131	2,34	Cu I	1,64	7,02	$4s^2 \ ^2D$	$4p'' \ ^2D^o$
13	236,98	1,82	Cu II	3,26	8,49	$4s \ ^1D$	$4p \ ^3F^o$
14	239,26	2,86	Cu I	1,64	6,82	$4s^2 \ ^2D$	$6p \ ^2P^o$
15	244,16	2,12	Cu I	0,00	5,08	$4s \ ^2S$	$4p' \ ^4P^o$
16	249,21	2,08	Cu I	0,00	4,97	$4s \ ^2S$	$4p' \ ^4P^o$
17	254,48	2,25	Cu II	8,52	13,39	$4p \ ^3F^o$	$5s \ ^3D$
18	261,83	2,55	Cu I	1,39	6,12	$4s^2 \ ^2D$	$5p \ ^2P^o$
19	279,17	2,86	Cu II	14,33	18,77	$4d \ ^3G$	$6f \ ^3H^o$
20	282,43	2,5	Cu I	1,39	5,78	$4s^2 \ ^2D$	$4p' \ ^2D^o$
21	306,34	3,13	Cu I	1,64	5,68	$4s^2 \ ^2D$	$4p' \ ^2P^o$
22	324,75	9,98	Cu I	0	3,82	$3d^{10} 4s \ ^2S$	$4p \ ^2P^o$
23	327,39	8,19	Cu I	0	3,39	$3d^{10} 4s \ ^2S$	$4p \ ^2P^o$
24	354,89	4,10	N <sub>2</sub>	Вторая положительная система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+ (3;2)$			
25	357,69	4,37	N <sub>2</sub>	Вторая положительная система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+ (0;1)$			
26	420,06	5,04	Ar I	11,55	14,50	$4s [ \ ^1/2 ]^o$	$5p [ 2 \ ^1/2 ]$
27	425,93	4,99	Ar I	11,83	14,74	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p' [ \ ^1/2 ]$
28	430,01	3,95	Ar I	11,62	14,51	$4s [ 1 \ ^1/2 ]^o$	$5p [ 1 \ ^1/2 ]$
29	433,35	5	Ar I	11,83	14,69	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p' [ 1 \ ^1/2 ]$
30	436,37	3,97	Ar I	11,62	14,46	$4s [ 1 \ ^1/2 ]^o$	$5p [ \ ^1/2 ]$
31	442,39	5,13	Ar I	11,72	14,52	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p' [ 1 \ ^1/2 ]$
32	451,07	4,25	Ar I	11,83	14,58	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p [ \ ^1/2 ]$
33	459,60	3,25	Ar I	11,83	14,52	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p' [ 1 \ ^1/2 ]$
34	460,95	3,32	Ar II	18,45	21,14	$4s' \ ^2D$	$4p' \ ^2F^o$
35	462,84	3,96	Ar I	11,83	14,51	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p [ 2 \ ^1/2 ]$
36	470,23	3,03	Ar I	11,83	14,46	$4s' [ \ ^1/2 ]^o$	$5p' [ 1 \ ^1/2 ]$
37	483,66	4,18	Ar I	12,91	15,47	$4p [ \ ^1/2 ]$	$9s [ 1 \ ^1/2 ]$
38	487,62	3,01	Ar I	12,91	15,45	$4p [ \ ^1/2 ]$	$7d [ 1 \ ^1/2 ]$
39	492,10	3,39	Ar I	13,09	15,61	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$10d [ 3 \ ^1/2 ]$
40	511,82	2,47	Ar I	13,09	15,52	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$6d' [ 2 \ ^1/2 ]^o$
41	516,22	2,98	Ar I	12,91	15,31	$4p [ \ ^1/2 ]$	$6d [ \ ^1/2 ]$
42	518,77	3,36	Ar I	12,91	15,30	$4p [ \ ^1/2 ]$	$5d' [ 1 \ ^1/2 ]^o$
43	521,82	2,4	Cu I	3,82	6,19	$3d^{10} 4p \ ^2P^o$	$3d^{10} 4d \ ^2D$
44	525,27	4,53	Ar I	13,09	15,45	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$7d [ 3 \ ^1/2 ]$
45	570,02	1,96	Cu I	1,64	3,82	$3d^9 4s^2 \ ^2D$	$3d^{10} 4p \ ^2P^o$
46	601,36	1,92	Ar I	13,08	15,14	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$5d [ \ ^1/2 ]^o$
47	617,01	1,84	Ar I	13,17	15,18	$4p [ 1 \ ^1/2 ]$	$7s [ 1 \ ^1/2 ]^o$
48	653,81	3,17	Ar I	13,08	14,95	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$4d' [ \ ^1/2 ]^o$
49	659,61	2,85	Ar I	13,08	14,95	$4p [ 2 \ ^1/2 ]$	$4d' [ \ ^1/2 ]^o$

Так, в [7] для искрового разряда в аргоне в условиях атмосферного давления между электродами из алюминия при  $d = 10$  мм в спектре излучения был зарегистрирован интенсивный континуум в диапазоне длин волн 350–460 нм с максимумом при  $\lambda = 420$  нм.

На участках спектра излучения плазмы разряда (рис. 2) на смеси аргона с парами меди в УФ-диапазоне длин волн 214–330 нм (линии 1–23, см. таблицу) наблюдалось излучение на переходах атома и однозарядного иона меди. Наиболее интенсивной ионной спектральной

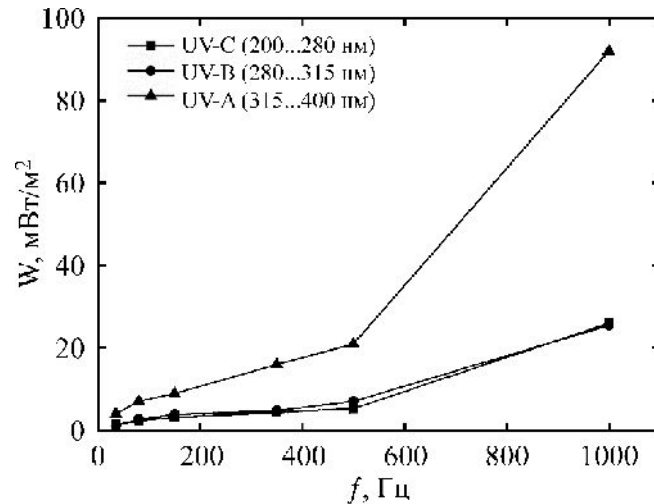


Рис. 3. Зависимость интенсивности УФ-излучения УФ-С, УФ-В, УФ-А – диапазонов высоковольтного наносекундного разряда от частоты повторения импульсов при зарядном напряжении  $U = 13$  кВ ( $f = 80$  Гц,  $p(\text{Ar}) = 101$  кПа,  $d = 2$  мм).

линией была линия с  $\lambda = 227,62$  нм Cu II, а из атомных наиболее интенсивными были резонансные спектральные линии меди с  $\lambda = 324,75$  и  $327,39$  нм Cu I, у которых нижним энергетическим уровнем является основной уровень.

Наивысшей энергией верхнего уровня для линий Cu II была  $E_{\text{верх}} = 18,77$  эВ, а для атомных линий максимальная энергия верхнего уровня составляла  $E_{\text{верх}} = 7,18$  эВ. В УФ-спектре также наблюдались две полосы второй положительной системы молекулы азота, поскольку в данных экспериментах откачка разрядной камеры происходила только до остаточного давления воздуха  $\approx 10$  Па. В диапазоне длин волн 360–659 нм наблюдалось излучение преимущественно на переходах Ag I, Ag II, а также одна интенсивная спектральная линия атома водорода ( $\lambda = 656,29$  нм), обусловленная остаточным давлением воздуха в камере после ее откачки форвакуумным насосом.

При расстоянии между электродами 2 мм и использовании биполярного генератора высоковольтных наносекундных импульсов происходит формирование одного или нескольких (при сильном перенапряжении разрядного промежутка) катодных пятен,двигающихся навстречу друг другу.

Для высоковольтного наносекундного разряда в аргоне в условиях атмосферного давления некоторые оптические и газодинамические характеристики катодной плазмы приводились в [8, 9]. Однако в этих экспериментах, проведенных при межэлектродном расстоянии  $d = 10$  мм между электродами из алюминия, четко фиксировалось излучение плазмы катодного пятна диаметром  $\approx 0,2$ – $0,3$  мм и привязанной к ней плазмы диффузного разряда, занимавшей большую часть разрядного промежутка. Формирование катодных пятен в перенапряженном наносекундном разряде

объясняется взрывоэмиссионной моделью [2], основанной на значительной энергии на микроостриях поверхности катода с последующим их нагревом и взрывом. Катодное пятно формировалось одновременно с началом резкого роста тока и спада напряжения на промежутке, и на начальных стадиях формирования оно было полусферическим и имело скорость расширения  $\approx 2,5 \times 10^6$  см/с. Такой скорости движения катодного пятна соответствовала кинетическая энергия 50–100 эВ, при которой формируется эктон с числом электронов  $10^{11}$ – $10^{12}$  и сгусток паров металла. На начальной стадии разряда радиус катодного пятна не превышал  $\approx 10^{-6}$  м и в течение от 5 до 50 нс он увеличивался от  $0,5 \times 10^{-4}$  до  $4,3 \times 10^{-4}$  см [8].

Температура электронов прикатодной плазмы аргона в условиях атмосферного давления, которая оценивалась по относительным интенсивностям излучения спектральных линий аргона, в начальные моменты ее формирования (на промежутке времени  $\approx 30$ – $40$  нс) достигала 5 эВ, а в последующие моменты времени ( $\tau = 50$ – $50$  нс) уменьшалась от 4,2 до 3,4 эВ [8].

На рис. 3 представлены результаты оптимизации средней интенсивности УФ-излучения разряда в зависимости от частоты повторения импульсов.

Максимальные величины средней мощности УФ-излучения в аргоне при давлении аргона 101 кПа для разных диапазонов УФ-излучения составляли: УФ-С (200–280 нм) – 67 мВт/м², УФ-В (280–315 нм) – 65 мВт/м² и УФ-А (315–400 нм) – 204 мВт/м² (при  $U = 20$  кВ,  $f = 1$  кГц).

При увеличении частоты повторения импульсов от 40 до 1000 Гц наибольшим был рост интенсивности излучения разряда в UV-A (315–400 нм) диапазоне, в частности, в диапазоне частот  $\Delta f = 350$ – $1000$  Гц она увеличивалась от 15



до 95 мВт/м<sup>2</sup>. Для диапазонов UV-B, UV-C рост плотности мощности излучения был значительно меньше и составлял от 3,0 до 25,0 мВт/м<sup>2</sup>.

Увеличение интенсивности УФ-излучения разряда в зависимости от величины зарядного напряжения на рабочем конденсаторе высоковольтного модулятора при фиксированной частоте повторений было менее эффективным и находилось в диапазоне 8,0–24 мВт/м<sup>2</sup>. При этом относительные соотношения между интенсивностями излучения в диапазонах УФ-С, УФ-В, УФ-А были такими же, как и для соответствующих зависимостей от частоты.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при давлении аргона 101 кПа между электродами из меди при межэлектродном расстоянии 2 мм зажигался однородный в пространстве перенапряженный наносекундный разряд с импульсной электрической мощностью до 1,2 МВт, а энергетический вклад в плазму за один импульс составлял 176 мДж. Исследование спектральных характеристик плазмы на основе парогазовых смесей медь–аргон показало, что наиболее интенсивными были резонансные спектральные линии атома меди ( $\lambda = 324,75$  и  $327,39$  нм Cu I); из линий однозарядного иона меди в интервале 200–330 нм наиболее интенсивной была линия  $\lambda = 227,62$  нм. Из спектральных линий в видимом диапазоне спектра выделялась линия с  $\lambda = 618,86$  нм иона меди.

Максимальное значение средней мощности УФ-излучения при  $p(\text{Ar}) = 101$  кПа наблюдалось для диапазона УФ-А при абсолютной плотности излучения 204 мВт/м<sup>2</sup>. Наиболее эффективным было увеличение частоты повторения импульсов до 1000 Гц, а не возрастание величины зарядного напряжения на рабочем конденсаторе высоковольтного модулятора.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шуаибов, О.К., Малініна, А.О., Малінін, О.М., *Нові газорозрядні методи одержання селективного ультрафіолетового і видимого випромінювання та синтезу наноструктур оксидів перехідних металів: монографія*, Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. 188 с.
2. Месяц, Г.А., Эктон – лавина электронов из металла, *Успехи физических наук*, 1995, т. 165, № 6, с. 601. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199506a.0601>.
3. Маршак, И.С., Электрический пробой газа при давлениях, близких к атмосферному, *Успехи физических наук*, 1960, т. 71, № 4, с. 631. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0071.196008c.0631>.
4. Shuaibov, A.K., Laslov, G.E. and Kozak, Ya.Ya., Emission characteristics of the cathode region of nanosecond discharge in atmospheric-pressure air, *Optics and Spectroscopy*, 2014, vol. 116, № 4, p. 552. <https://doi.org/10.1134/S0030400X14030199>.
5. Shuaibov, A., Minya, A., Malinina, A., Malinin, A., et al, Synthesis of nanostructured transition metal oxides by a nanosecond discharge in air with assistance of the deposition process by plasma UV-radiation, *Adv. Natur. Sci.: Nanoscience Nanotechnol.*, 2018, vol. 9, № 3, 035018. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aadc4b>.
6. 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, № 4, p. 510. <https://doi.org/10.3103/S106837552004016X>.
7. Shuaibov, A.K., Minya, A.Y., Malinina, A.A., Malinin, A.N., et al., Study of the formation conditions of aluminum oxide nanoparticles in an overstressed nanosecond discharge between aluminum electrodes in a mixture of nitrogen and oxygen, *J. Metal. Mater. Res.*, 2020, vol. 3, no. 2, p. 37. <https://doi.org/10.30564/jmmr.v3i2.2441>.
8. Курбанисмаилов, В.С., Омаров, О.А., Рагимханов, Г.Б., Излучательные и спектральные характеристики искрового канала в аргоне, *Прикладная физика*, 2014, т. 2, № 3, с. 35.
9. Омаров, О.А., Омарова, Н.О., Омарова, П.Х., Аливердиев, А.А., Пробой газов высокого давления в продольном магнитном поле, *Теплофизика высоких температур*, 2019, т. 57, № 2, с. 174. <https://doi.org/10.1134/S0040364419020169>.
10. Tarasenko, V.F., *Runaway electrons preconized diffuse discharge*, New York: Nova Science Publishers Inc., 2014. 578 p.
11. Beloplotov, D.V., Lomaev, V.I., Sorokin, D.A. and Tarasenko, V.F., Blue and green jets in laboratory discharges initiated by runaway electrons, *J. Physics: Conf. Series*, 2015, vol. 652, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/652/1/012012>.

## Summary

The characteristics of a pulse periodic source of a long-range UV radiation with overvoltage pumping by a bipolar discharge of nanosecond duration between copper electrodes in argon at atmospheric pressure are investigated. Copper vapors were introduced into the discharge due to the ectonic mechanism, in which a sufficient amount of the electrode material vapors is introduced into the discharge gap due to microexplosions of inhomogeneities of the surface of metal electrodes in a strong electric field of an overvoltage high-current nanosecond discharge. The characteristics of an overvoltage nanosecond discharge at a distance between the electrodes of 2 mm are studied. The emission spectra of the discharge were

analysed, and the intensity of the UV radiation of a point emitter was optimized depending on the supply voltage of the high-voltage modulator and the repetition rate of discharge pulses. The identification of the emission spectra of plasma made it possible to establish the main excited plasma products that form the spectrum of the UV radiation of the plasma. The study of the spectral characteristics of plasma based on gas-vapor mixtures "copper – argon" showed that the most intense were the spectral resonance

spectral lines of the copper atom and ion. It was found that a space-uniform overvoltage nanosecond discharge was ignited between copper electrodes at an inter-electrode distance of 2 mm. It was found that the maximum value of the average UV power at  $p(\text{Ar}) = 101 \text{ kPa}$  was observed for the UV-A range.

*Keywords:* overvoltage bipolar discharge of nanosecond duration, plasma, argon, copper, radiation