

Характеристики сильноточного импульсного разряда в воздухе с эктонным механизмом инъекции паров меди в разрядный промежуток

* А. К. Шуаибов, А. Й. Миня, З. Т. Гомоки, В. В. Данило, Р. В. Пинзеник

Государственное высшее учебное заведение «Ужгородский национальный университет»,
г. Ужгород, 88000, Украина, *e-mail: alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

Приведены характеристики биполярного сильно перенапряженного наносекундного разряда в воздухе между электродами из меди. При межэлектродном расстоянии 1–2 мм и давлении воздуха 0,05–3,0 атм реализованы условия получения однородного объемного разряда в неоднородном электрическом поле, связанные с генерацией рентгеновского излучения. Показано, что данный разряд является простым точечным источником излучения в спектральном диапазоне 200–230 нм на переходах однозарядных ионов меди. Приведены результаты оптимизации УФ-излучателя в зависимости от условий накачки и параметров разрядной среды.

Ключевые слова: биполярный наносекундный разряд, медь, воздух, спектр излучения и пропускания, наноструктуры.

УДК: 537.52:621.327

DOI: 10.5281/zenodo.1168351

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее эффективными и мощными газоразрядными ультрафиолетовыми лампами являются эксиплексные лампы на электронно-колебательных переходах моногалогенидов инертных газов (XeCl, XeBr, KrF, KrCl и других подобных молекулах) с накачкой разными видами барьерного разряда [1, 2]. Не менее эффективными эксиплексными лампами для видимой области спектра являются излучатели на моногалогенидах ртути с рабочей средой на основе солей дигалогенидов ртути [3]. Они получают широкое распространение в фотохимии, фотобиологии, микронанoeлектронике, медицине, экологии и ряде других областей науки и техники [4, 5]. Излучают эти лампы в виде одной полосы шириной до 10 нм или нескольких таких полос, но перекрывают излучением спектральный диапазон 120–355 нм, только частично. Окно в спектральном интервале 210–220 нм не перекрывается излучением эксиплексных газоразрядных ламп.

Для ряда спектроскопических применений требуются «точечные» источники сравнительно интенсивного УФ-излучения с объемом плазмы на уровне 1–5 мм³, которые невозможно технически реализовать с помощью барьерного разряда [6]. Поэтому актуальной является разработка «точечной» УФ-лампы на парах меди, перекрывающей спектральный интервал 200–230 нм. Основным газом такой лампы может быть воздух при давлении $p = 1$ атм, что важно для разработки безоконных точечных ламп с недорогой рабочей средой, свободных от

проблем загрязнения рабочего окна продуктами распыления электродов. В плазме наносекундных разрядов в воздухе одним из основных накопителей энергии являются молекулы азота в метастабильном состоянии. Энергия с этих состояний эффективно передается атомам меди [7]. Ступенчатое возбуждение и ионизация метастабильных или квазиметастабильных атомов меди способствуют образованию ионов меди в возбужденных состояниях.

Исследование импульсных разрядов между металлическими электродами в воздухе при их зажигании от генераторов высоковольтных импульсов наносекундной длительности показало, что на их основе могут быть разработаны селективные «точечные» ультрафиолетовые (УФ) лампы, наполненные парами материала электродов [8]. Такие разряды в воздухе атмосферного давления при малых межэлектродных расстояниях ($d = 1–2$ мм) являются пространственно однородными даже при сильно неоднородном распределении напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Они зажигаются в сильно перенапряженных газовых промежутках и могут сопровождаться генерацией пучка убегających электронов и сопутствующего рентгеновского излучения [9]. Убегające электроны и сопутствующее рентгеновское излучение выполняют роль автоматической предьонизации, что важно при использовании подобных разрядов в качестве ультрафиолетовых излучателей. Характеристики подобных излучателей наиболее детально исследованы при использовании монополярных импульсов высокого напряжения длительностью 1–5 нс [10].

Поскольку спектры излучения этих разрядов в УФ-диапазоне длин волн определяются спектральными линиями атомов и ионов материала электродов, то представляет интерес исследование оптических характеристик плазмы таких излучателей и с накачкой импульсами тока и напряжения порядка 50–100 нс. Применение биполярных импульсов высокого напряжения делает разрядное устройство более компактным, что позволяет равномерно использовать материал электродов при его разрушении в сильных электрических полях за счет эктонного механизма ввода паров металла в разрядную плазму воздуха [11]. Под эктонами подразумевают возникновение кратковременных лавин электронов, когда условия для своей эмиссии эти электроны обеспечивают сами. Термин «эктон» происходит от начальных букв английского выражения “explosive centre”. Появление эктонов в высоковольтных газовых разрядах обычно связывают с автоэлектронной эмиссией с катодных микровыступов, плотность тока в подобных разрядах достигает 10^7 – 10^9 А/см², что приводит к взрывам микровыступов на поверхности катода. Время эмиссии электронов не превышает 10 нс, а в дальнейшем эмиссия сама по себе затухает, поскольку взрывной центр самоохлаждается вследствие высокой теплопроводности металлического катода. Эти процессы сопровождаются спадом плотности тока и уменьшением массы выброса материала электрода [12, 13].

В настоящей статье приводятся результаты исследования пространственных, электрических и оптических характеристик биполярного сильноточного разряда с медными электродами в воздухе.

ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Конструкция системы электродов, между которыми зажигался наносекундный разряд в воздухе, представлена на рис. 1. Электроды устанавливались в герметичную камеру из диэлектрика объемом 3 литра. Большинство экспериментов проведено в безоконном режиме работы УФ-излучателя (когда выходное окно из кварца отсутствовало) при давлении воздуха 1 атм. Перед напуском воздуха в камеру она могла откачиваться до остаточного давления воздуха 5–10 Па. Давление в камере варьировалось в диапазоне (0,05–3,0) атм.

Для уменьшения влияния электромагнитных наводок на систему регистрации характеристик разряда ячейка с системой электродов устанавливалась в экран из металлической сетки. Диаметр цилиндрических медных электродов равнялся 5 мм, а радиус закругления рабочей торцевой части электродов – 3 мм.

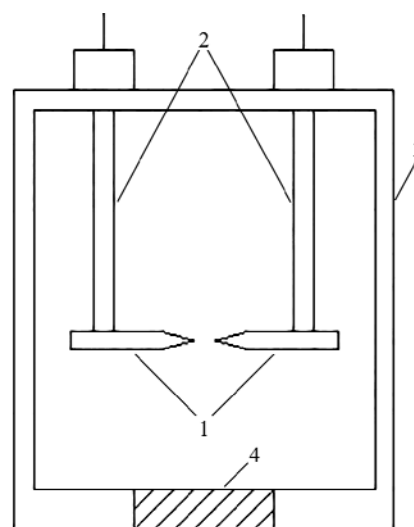


Рис. 1. Схема разрядной камеры: 1 – медные электроды; 2 – высоковольтные вводы-держатели электродов из меди; 3 – вакуумная камера из диэлектрика; 4 – окно из кварца марки КУ.

Для зажигания разряда на электроды подавались биполярные импульсы высокого напряжения общей длительностью 50–100 нс и амплитудой $\pm(20\text{--}40)$ кВ. При этом между кончиками электродов зажигался однородный разряд с амплитудой импульсов тока 50–170 А [14]. Объем плазмы не превышал 5–10 мм³. При межэлектродном расстоянии 1 мм разрядный промежуток был сильно перенапряжен. При таком режиме зажигания разряда создавались благоприятные условия для формирования пучка электронов высокой энергии, которые вступали в режим непрерывного ускорения и покидали разрядный промежуток [3]. Как показали прямые измерения интенсивности пучка убегающих электронов, проходящих через тонкий металлический пленочный анод, в наносекундном сильноточном разряде в азоте при разрядном напряжении порядка 30–35 кВ и расстоянии между электродами 2–20 мм пучок убегающих электронов формируется только при давлениях азота, меньших 100 торр [15]. Поэтому в условиях нашего эксперимента при давлении воздуха в диапазоне $p = 1\text{--}3$ атм основным фактором, способствующим формированию сравнительно однородного наносекундного разряда, является действие системы предварительной ионизации, роль которой в данном случае выполняют УФ-ВУФ и рентгеновское излучение плазмы разряда.

Импульсы напряжения на разрядном промежутке и ток разряда измерялись с помощью широкополосного емкостного делителя, пояса Роговского и широкополосного осциллографа 6-ЛОР 04. Временное разрешение этой системы регистрации составляло 2–3 нс. Исследование пространственных характеристик разряда прово-

дилось с помощью цифровой фотокамеры. Частота следования импульсов варьировалась в диапазоне $f = 35\text{--}1000$ Гц. Для регистрации спектров излучения плазмы использовались монохроматор МДР-2, фотоумножитель ФЭУ-106, усилитель постоянного тока и электронный потенциометр. Излучение плазмы разряда анализировалось в спектральной области 200–650 нм. Система регистрации излучения плазмы калибровалась по излучению дейтериевой лампы в спектральном диапазоне 200–400 нм и банд-лампы в диапазоне 400–650 нм.

Измерение суммарной относительной мощности УФ-излучения разряда в спектральном диапазоне 200–280 нм проводилось с помощью ультрафиолетового измерителя мощности излучения «ТКА-ПКМ».

ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА

В статье приведены результаты исследования пространственных, электрических и оптических характеристик сильноточного наносекундного разряда на парах меди и воздуха при условии взрывов микроострий на поверхности электродов и формирования эктонов, а также при сильном перенапряжении разрядного промежутка в воздухе при давлениях 1–3 атм.

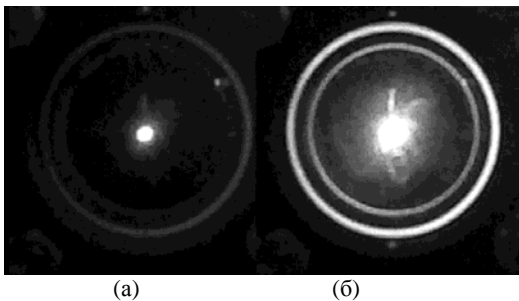


Рис. 2. Фотографии разряда в воздухе атмосферного давления при расстоянии между электродами $d = 1$ мм и частотах следования импульсов напряжения 40 (а) и 400 (б) Гц.

Фотографии разрядов при разных частотах следования импульсов напряжения в воздухе атмосферного давления приведены на рис. 2. При небольших частотах следования импульсов накачки $f = 35\text{--}150$ Гц разряд имел диффузный вид, а диаметр сферического плазмообразования в разрядном промежутке был примерно равен величине межэлектродного расстояния (рис. 1а). При увеличении частоты следования импульсов напряжения до 400–1000 Гц диаметр плазмообразования увеличивается в 3–4 раза и охватывает новые участки поверхности сферической части электродов (рис. 1б). Такое поведение разряда может быть обусловлено остаточными яв-

лениями в плазме, когда плотность заряженных частиц не успевает релаксировать к своему начальному значению в межимпульсный период.

Диффузный вид исследуемого разряда при атмосферном давлении воздуха подтверждается результатами исследования пространственных характеристик поперечного наносекундного разряда без специальной системы предыонизации, зажигаемого от модулятора с амплитудой импульсов напряжения, меньшей 35 кВ, в азоте при $p = 30\text{--}760$ торр. Фотографирование этого разряда с параллельным исследованием его пространственных характеристик с помощью CCD камеры показало, что диффузный вид подобных разрядов сохраняется на протяжении всей длительности импульса напряжения и при разных частотах следования [15].

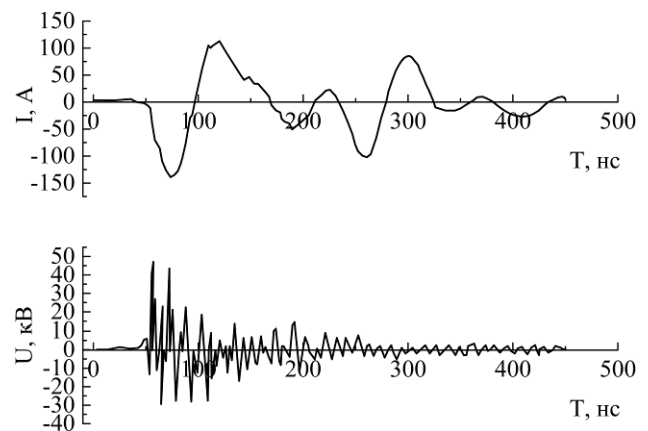


Рис. 3. Импульсы напряжения и тока биполярного наносекундного разряда при давлении воздуха $p = 101,325$ кПа ($d = 1$ мм).

Из-за несогласования выхода высоковольтного модулятора с разрядом и наличия отраженных импульсов от разрядного промежутка с плазмой импульс напряжения состоял из отдельных пичков длительностью примерно 5–10 нс. Длительность основной части цуга импульсов напряжения достигала 50–100 нс. Биполярные пички импульса напряжения имели амплитуду положительной и отрицательной составляющих до 30 кВ (рис. 3). Импульсы тока наносекундного разряда представляли собой последовательность коротких биполярных пичков тока с амплитудой положительных и отрицательных выбросов 120–150 А. Общая длина последовательности пичков тока со спадающей по времени амплитудой достигала 150–200 нс (рис. 3). Путем графического умножения осциллограммы импульсов тока и напряжения было получено распределение по времени импульсного энерговысвобождения в плазму биполярного наносекундного разряда. Максимальная импульсная мощность разряда наблюдалась в начальной стадии пробоя разрядного промежутка и достигала 4 МВт.

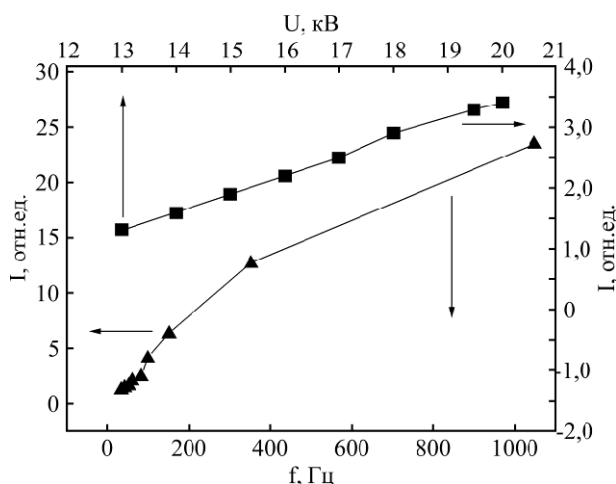


Рис. 4. Зависимости относительной интенсивности УФ-излучения плазмы биполярного наносекундного разряда в спектральном диапазоне 200–280 нм от частоты следования импульсов тока при зарядном напряжении рабочего конденсатора высоковольтного модулятора $U_3 = 13$ кВ (1) и от величины зарядного напряжения рабочей емкости высоковольтного модулятора (2) (при $f = 35$ Гц).

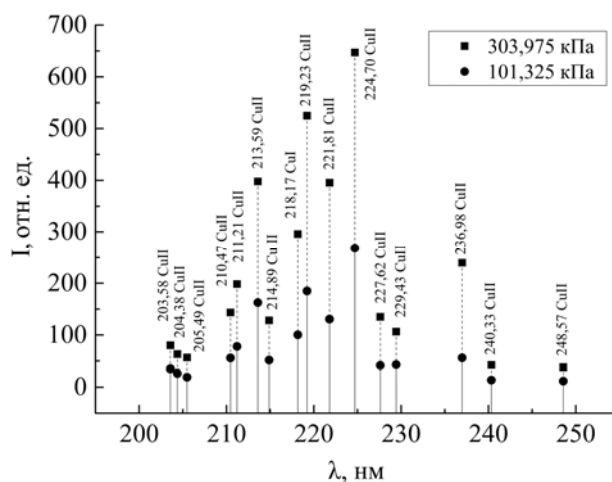


Рис. 5. Участок спектра излучения плазмы с наиболее интенсивными спектральными линиями излучения атомов и ионов меди при давлении воздуха 101,325 кПа и 303,975 кПа ($U_3 = 13$ кВ, $d = 1$ мм и $f = 40$ Гц).

Результаты отождествления наиболее интенсивных спектральных линий в спектре излучения биполярного наносекундного разряда в воздухе ($p = 1$ атм, $d = 1$ мм и $f = 100$ Гц)

λ , нм	Объект	$I_{отн.ед.}$	E_n , эВ	E_e , эВ	Переход
203,1	Cu II	15	8,23	14,34	$4p^3P^0-4d^3P$
203,5	Cu II	30	2,98	9,06	$4s^3D-4p^3D^0$
203,7	Cu II	30	2,83	8,92	$4s^3D-4p^1F^0$
204,3	Cu II	60	2,72	8,78	$4s^3D-4p^3D^0$
205,4	Cu II	50	2,83	8,86	$4s^3D-4p^3D^0$
212,6	Cu II	50	2,83	8,66	$4s^3D-4p^3F^0$
213,5	Cu II	75	2,72	8,52	$4s^3D-4p^3F^0$
224,1	Cu I	2	11,83	17,36	$4d^4D-15^0$
224,7	Cu II	75	2,72	8,32	$4s^3D-4p^3P^0$

Интегрирование по времени импульсной мощности позволило определить электрическую энергию, которая вносилась в плазму исследуемого разряда за время одной последовательности импульсов напряжения и тока. Для условий зажигания биполярного наносекундного разряда при давлении воздуха в 1 атм и других условиях, приведенных под рис. 2, эта величина энергии в максимуме достигала $E = 105$ мДж [14].

На рис. 4 приведены зависимости средней мощности УФ-излучения плазмы разряда (в отн. ед.) в спектральном диапазоне 200–280 нм от частоты следования импульсов напряжения (тока) и величины зарядного напряжения рабочей емкости высоковольтного модулятора.

Как видно из рис. 4, зависимость мощности УФ-излучения разряда от частоты была нелинейной, максимальное ее увеличение наблюдалось в диапазоне частот 40–50 Гц. При увеличении частоты следования импульсов напряжения

от 50 до 1000 Гц средняя мощность УФ-излучения разряда повышалась примерно на порядок. Увеличение же зарядного напряжения рабочего конденсатора от 13 до 20 кВ (при $f = 35$ Гц) приводило к росту мощности УФ-излучения разряда примерно в два раза. Полученные результаты показывают, что для повышения средней мощности УФ-излучения разряда наиболее перспективным является увеличение частоты следования импульсов напряжения.

Исследование спектральных характеристик излучения разряда показало, что примерно 90% его мощности излучения плазмы в спектральном диапазоне 200–1000 нм сосредоточено в спектральном интервале 200–230 нм.

На рис. 5 представлен участок спектра излучения ($\lambda = 200$ –230 нм) плазмы наносекундного разряда в воздухе между электродами из меди. Спектр приведен к чувствительности фотоумно-

жителя и монохроматора в этом спектральном диапазоне длин волн. Увеличение давления воздуха в диапазоне 1–3 атм приводило к увеличению интенсивности всех спектральных линий в диапазоне длин волн 200–230 нм.

Как и для менее мощного униполярного наносекундного разряда между медными электродами [8], основными в спектре излучения были спектральные линии ионов меди. Полученный нами спектр УФ-излучения также хорошо коррелируется со спектром излучения униполярного наносекундного разряда с пучком убегающих электронов (при длительности импульсов напряжения 1–5 нс между электродами из меди и $d = 0,5$ мм) [10].

Результаты отождествления спектра излучения приведены в таблице.

Поскольку в условиях настоящего эксперимента основным механизмом попадания в плазму паров меди является эктонный (взрыв микроострий на поверхности электродов), при котором плотность электронов в плазме может достигать 10^{16} – 10^{17} см⁻³ [11], то механизм образования возбужденных ионов меди может определяться процессами возбуждения ионов меди в основном состоянии электронами, а также процессами электрон-ионной рекомбинации. Эффективные сечения этих процессов, например для ионов индия, цинка и кадмия, достаточно велики и достигают 10^{-16} см² [16, 17].

ВЫВОДЫ

Установлено, что наносекундный разряд в воздухе атмосферного давления между электродами из меди при сильном перенапряжении разрядного промежутка является селективным источником излучения ионов меди в спектральном диапазоне 200–230 нм; достигнут максимальный импульсный энерговыдел в плазму – 4 МВт, а энергия, вкладываемая в разряд за один импульс, составляет примерно 0,1 Дж; наиболее вероятным механизмом возбуждения УФ-излучения ионов меди являются эктонный механизм эрозии поверхности медных электродов, дальнейшее возбуждение и ионизация атомов и ионов меди электронным ударом, а также образование ионов Cu^{+*} в процессах электрон-ионной рекомбинации двухзарядных ионов меди и электронов.

ЛИТЕРАТУРА

- Shuaibov A., Minya A., Gomoki Z., Critzak R. et al. *J of Electrical Engineering*. 2014, **2**(2), 96–100.
- General A.A., Avtaeva S.V. *J Phys D Appl Phys*. 2017, **50**, 495202.
- Malinina A.A., Shuaibov A.K., Malinin A.N. *IOSR Journal of Applied Physics*. 2017, **9**(1), 51–57.
- Shuaibov A.K., Shevera I.V., Shimon L.L., Sosnin E.F. *Современные источники ультрафиолетового излучения: разработка и применения*. Ужгород-Томск: Говерла, 2006. 222 с.
- Shuaibov A.K. *Многоэлектродный коронный разряд в газах высокого давления*. Ужгород: Говерла, 2015. 136 с.
- Bakst T.Kh., Tarasenko V.F., Shut'ko Yu.V., Erofeev M.V. *Quantum Electronics*. 2012, **42**(2), 153–156.
- Lomaev M.I., Beloplotov D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. *Opt Spectrosc*. 2016, **120**(2), 171–175.
- Shuaibov A.K., Laslov G.E. and Kozak Ya.Ya. *Optics and Spectroscopy*. 2014. **116**(4), 552–556.
- Runaway electrons preionized diffuse discharge*. Ed. by V.F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers Inc., 2014. 578 p.
- Avtaeva S.B., Zhdanova O.S., Pikulev A.A., Sosnin E.A. и др. *Новые направления в научных исследованиях и применении эксилламп*. Томск: STT, 2013.
- Shuaibov O.K., Minya O.Y., Gomoki Z.T., Danilo V.V. *Безвіконна, точкова, ультрафіолетова лампа*. Україна патент на корисну модель. U 2016 04596. 10.11.2016. Бюллетень № 21.
- Бугаев С.П., Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. *УФН*. 1975, **115**(1), 101–120.
- Mesyats G.A. *Usp Fizich Nauk*. 1995, **165**(6), 601–626.
- Shuaibov A., Mynia O., Chuchman M., Homoki Z. et al. *Proceedings of the XIII International Conference "Electronics and Applied Physics*. October 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine. 151–152.
- Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др. *Квантовая электроника*. 2015, **45**(4), 366–370.
- Ovcharenko E.V., Imre A.I., Gomoni A.N., Hutych Yu.I. *J Phys B At Mol Opt Phys*. 2010, **43**(17), 230–234.
- Gomoni A.N. *J Appl Spectrosc* 2015, **82**(1), 17–22.

Поступила 18.07.17

Summary

The characteristics of a bipolar high-current nanosecond discharge in the air between the copper electrodes is given. With an inter-electrode distance of 1–2 mm and the air pressure of 0.05–3.0 atm the conditions of obtaining a homogeneous volume discharge in the inhomogeneous electric field, associated with the generation of a beam of runaway electrons and concomitant X-ray radiation, are realized. It is shown that this discharge is a simple point source of radiation in the spectral range of 200–230 nm on the transitions of singly charged copper ions. The results of optimization of the UV-emitter depending on the pump conditions and parameters of the discharge medium are provided. It is found that, under the influence of a discharge, a deposition of thin nanostructured membranes made of electrodes erosion products and products of dissociation of air molecules is possible.

Keywords: bipolar nanosecond discharge, copper, air, emission and transmission spectrum, nanostructures.