

Исследование синхронных потоков бактерицидного ультрафиолетового излучения и оксидов переходных металлов (Zn, Cu, Fe) в импульсном газоразрядном реакторе на основе перенапряженного наносекундного разряда в воздухе

* А. К. Шуаибов, А. Й. Миня, А. А. Малинина, А. Н. Малинин,
З. Т. Гомоки, И. В. Шевера, В. В. Данило

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

Поступила 13.02.2019
После доработки 20.05.2019
Принята к публикации 20.05.2019

Приводятся характеристики перенапряженного сильноточного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления между электродами из цинка, меди и железа, расположенными на расстоянии 1–3 мм. Установлено, что данный разряд является точечным источником ультрафиолетового излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм и потока оксидов цинка, меди и железа и их кластеров. Приведены результаты оптимизации УФ-излучателя в зависимости от условий накачки и параметров разрядной среды, а также оптические характеристики пленочных наноструктур оксидов переходных металлов, осажденных на поверхность подложки из стекла.

Ключевые слова: сильноточный наносекундный разряд, цинк, медь, железо, воздух, спектр излучения и пропускания, наноструктуры оксидов металлов, фотолюминесценция.

УДК 537.52:621.327

DOI: 10.5281/zenodo.3369706

ВВЕДЕНИЕ

Применение в биомедицинской инженерии газоразрядных источников бактерицидного ультрафиолетового (УФ) излучения, таких как лампы на парах или амальгамах ртути, ксеноне и молекулах галогенидов инертных газов, получило в последнее время значительное развитие [1–3]. Кроме фактора ультрафиолетового излучения для различных применений в медицине, биологии и агротехнологиях, важными являются и другие факторы газового разряда (радикалы), которые эффективно образуются в открытых плазменных источниках на основе воздуха атмосферного давления. Так, в [4] приведены характеристики источника на основе вспышечной короны, применение которого для плазменной предобработки семян салата показало, что всхожесть обработанных семян увеличивается более чем на 25%. В работе [5] для инактивации микроорганизмов был успешно применен барьерный разряд с плоскими электродами в воздухе атмосферного давления.

Исследованы характеристики открытого, перенапряженного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления между электродами из меди с эктонным механизмом внесения паров меди в разрядный промежуток [6]. Этот разряд является точечным источником ультрафиолетового излучения в спектральном интер-

вале 200–230 нм. Более детальное исследование этого разряда выявило, что одновременно с ультрафиолетовым излучением он является источником потока оксидов меди в виде отдельных молекул или, что более вероятно, кластеров разного состава, которые осаждались на подложку из стекла в форме наноструктурированных пленок [7, 8]. Наноструктуры на основе оксидов цинка и меди характеризуются ярко выраженным антимикробным эффектом [9–11], а магнитные наноструктуры оксидов железа перспективны для использования в качестве биологических сенсоров [12] и ряда других применений в медицине [13].

Поэтому разработка новых способов одновременного получения бактерицидного ультрафиолетового излучения и потоков наночастиц переходных металлов, которые позволят усилить инактивационные и антимикробные свойства газоразрядной плазмы воздуха, представляют значительный интерес для применений в микробиологии, медицине и агротехнологиях.

В настоящей статье рассматривается устройство импульсного плазмохимического реактора, приводятся параметры и оптические характеристики плазмы перенапряженного наносекундного разряда между электродами из переходных металлов (Zn, Cu, Fe), а также результаты исследования характеристик наноструктур оксидов переходных металлов.

УСТРОЙСТВО ГАЗОРАЗРЯДНОГО РЕАКТОРА. ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Конструкция импульсного газоразрядного реактора на основе биполярного перенапряженного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления представлена на рис. 1. Electroды диаметром 5 мм и длиной 30 мм из цинка, меди или нержавеющей стали устанавливались в герметичную камеру из диэлектрика объемом 3 литра. Радиус закругления рабочей торцевой части электродов составлял 3 мм. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок на систему регистрации характеристик разряда ячейка с системой электродов устанавливалась в экран из металлической сетки. Разряд для всех типов электродов исследовался при атмосферном давлении воздуха.

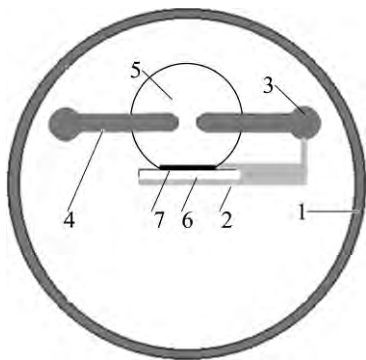


Рис. 1. Схема импульсного плазмохимического реактора: 1 – корпус диэлектрической разрядной камеры; 2 – система фиксации подложки для напыления тонких пленок; 3 – система регулирования межэлектродного расстояния; 4 – металлические электроды; 5 – зона осаждения пленок; 6 – подложка из стекла; 7 – пленка.

Для зажигания разряда на металлические 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, 15]. Объем плазмы не превышал 5–10 мм³. При межэлектродном расстоянии 1–3 мм разрядный промежуток был перенапряжен. При таком режиме зажигания разряда создавались благоприятные условия для эктонного ввода паров металлов из поверхности электродов, как и в статье [6], где использовались электроды из меди.

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 проводилось 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. Измерение суммарной относительной мощности УФ-излучения разряда в спектральном диапазоне 200–280 нм проводилось с помощью ультрафиолетового измерителя мощности излучения ТКА-ПКМ. Спектры пропускания излучения тонкими наноструктурированными пленками, которые осаждались на стеклянные подложки, регистрировались с помощью спектрометра OCEAN OPTICS USB 2000. Зондирующее излучение подавалось на пленку и подложку из стекла с использованием оптоволоконной системы.

Напыление пленок осуществлялось в течение 30–60 минут при установке стеклянной подложки на расстоянии 30 мм от центра разрядного промежутка, при межэлектродном расстоянии 1–3 мм, амплитуде импульсов напряжения ± 20 кВ и частоте следования импульсов 40–100 Гц.

Изображение поверхности тонких наноструктурированных пленок регистрировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа Cross Beam Workstation Auriga (Carl Zeiss).

Спектры рамановского рассеяния возбуждались с помощью лазера на ионах аргона, который генерировал излучение на длине волны 514,5 нм. Исследование спектров рамановского рассеяния излучения на тонких пленках оксидов переходных металлов проводилось с помощью спектрометра nVia Renishaw.

Спектры фотolumинесценции синтезированных пленок исследовались путем облучения пленки излучением дуговой ртутной лампы высокого давления на разных длинах волн в спектральном диапазоне: 270–600 нм. При этом излучение ртутной лампы в спектральных интервалах величиной 5 нм выделялось в пределах фиксированных длин волн с помощью отдельного монохроматора и направлялось в дальнейшем на поверхность пленки. Спектр фотolumинесценции наноструктур регистрировался отдельным спектрофотометром.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕННОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА

Рассмотрим результаты исследования характеристик и параметров плазмы перенапряженного наносекундного разряда в воздухе

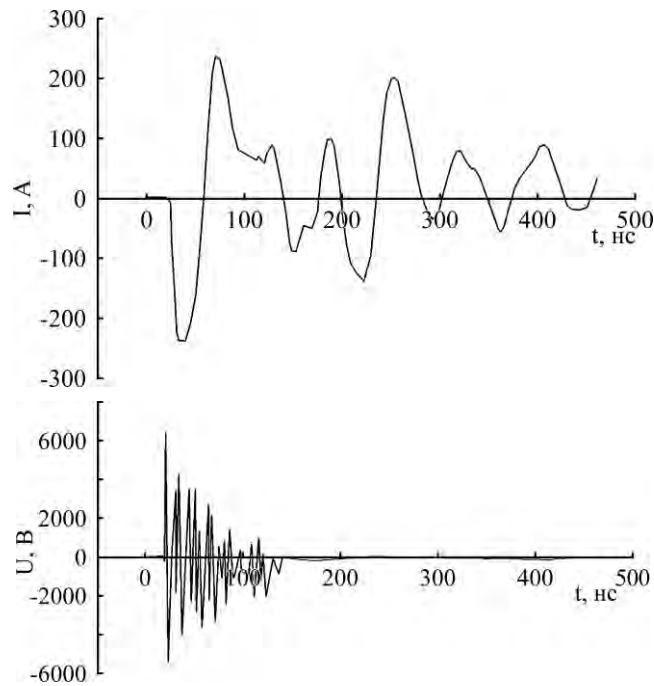


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения перенапряженного наносекундного разряда в воздухе между электродом из меди и электродом из нержавеющей стали (межэлектродное расстояние $d = 3$ мм).

между электродами из цинка, меди и железа при условии взрывов микроострий на поверхности электродов и формирования соответствующих эктонов. Фотографии разрядов при частоте следования импульсов напряжения ($f = 40\text{--}1000$ Гц) для всех типов электродов (Zn, Cu, Fe) и их комбинации, когда расстояние между ними находилось в пределах 1–3 мм, были аналогичными приведенным для разряда между медными электродами [6, 13]. При частотах следования разрядных импульсов в диапазоне 35–150 Гц разряд имел диффузный вид. Диаметр плазмы в межэлектродном промежутке примерно равнялся межэлектродному расстоянию. При частотах в интервале 400–1000 Гц диаметр плазмы перенапряженного наносекундного разряда увеличивался в 3–4 раза и охватывал новые участки рабочих поверхностей электродов. Причины зажигания достаточно однородного диффузного разряда в условиях настоящих экспериментов рассмотрены в [6, 16].

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока для разряда между электродами из меди и нержавеющей стали. Аналогичные осциллограммы были получены и для разрядов между электродами из цинка, меди и нержавеющей стали. Длительность основной части цуга импульсов напряжения достигала 50–120 нс. Биполярные пички импульса напряжения имели амплитуду положительной и отрицательной составляющих до 20–30 кВ. Импульсы тока разряда представляли собой последовательность импульсов тока с амплитудой положительных и отрицательных

импульсов 120–150 А. Общая длина последовательности импульсов тока со спадающей по времени амплитудой достигала 150–200 нс. Путем графического умножения осциллограммы импульсов тока и осциллограммы напряжения было получено распределение по времени импульсного вклада энергии в плазму исследуемого разряда. Максимальная импульсная мощность разряда наблюдалась в начальной стадии пробоя разрядного промежутка и достигала 2–4 МВт. Интегрирование по времени импульсной мощности позволило определить электрическую энергию, которая вносилась в плазму наносекундного разряда за время одной последовательности импульсов напряжения и тока. Для условий наших экспериментов величина энергии, которая вкладывалась в плазму за один импульс, достигала $E = 100$ мДж.

Спектры ультрафиолетового излучения плазмы исследуемого разряда между электродами из меди и результаты их идентификации приведены в [6], а спектры излучения разрядов между электродами из цинка и нержавеющей стали представлены на рис. 3 и 4. Примерно 90% мощности излучения плазмы в спектральном диапазоне 200–1000 нм для разрядов между электродами из цинка и меди сосредоточено в спектральном интервале 200–260 нм. Для перенапряженного наносекундного разряда между медными электродами основными в спектре излучения были спектральные линии ионов меди, в спектрах УФ-излучения разряда между электродами из цинка основными были спектральные линии атомов и ионов цинка:

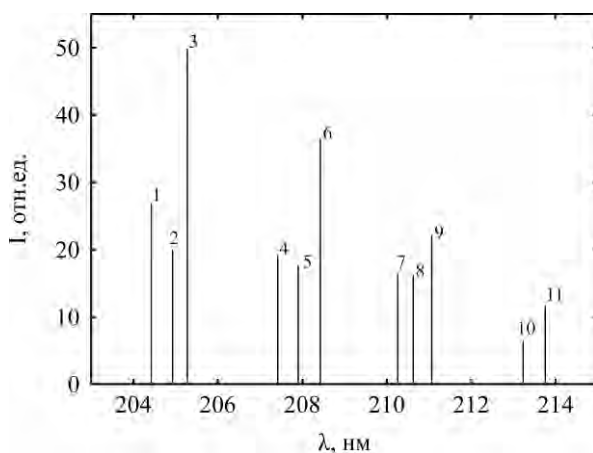


Рис. 3. Участок спектра излучения плазмы наносекундного разряда между электродами из цинка с наиболее интенсивными спектральными линиями атомов и ионов цинка ($d = 2$ мм; $f = 100$ Гц).

Результаты расшифровки спектра излучения наносекундного разряда между электродами из нержавеющей стали в воздухе (рис. 4)

λ , нм	Объект	I, отн. ед.	Нижний уровень	Верхний уровень
208,41	Fe I	100	$3d^6 4s^2$	$3d^5(^6S)4s^2 4p$
224,55	Fe II	300	$3d^6(^3H)4p$	$3d^6(^3H)4d$
241,78	Fe II	60	$3d^6(^3F2)4s$	$3d^6(^3F2)4p$
249,58	Fe I	10000	$3d^7(^4F)4s$	$3d^6(^3H)4s4p(^3P^o)$
253,68	Fe II	2000	$3d^6(^3H)4s$	$3d^6(^3H)4p$
272,80	Fe I	4000	$3d^7(^4F)4s$	$3d^6(^3F2)4s4p(^3P^o)$
309,15	Fe I	120	$3d^7(^4F)4s$	$3d^6(^3D)4s4p(^1P^o)$

202,6; 206,2 нм Zn II; 250,2; 255,8 нм Zn I. Результаты идентификации основных спектральных линий атомов и ионов железа, которые наблюдались в разряде между электродами из нержавеющей стали, приведены в таблице.

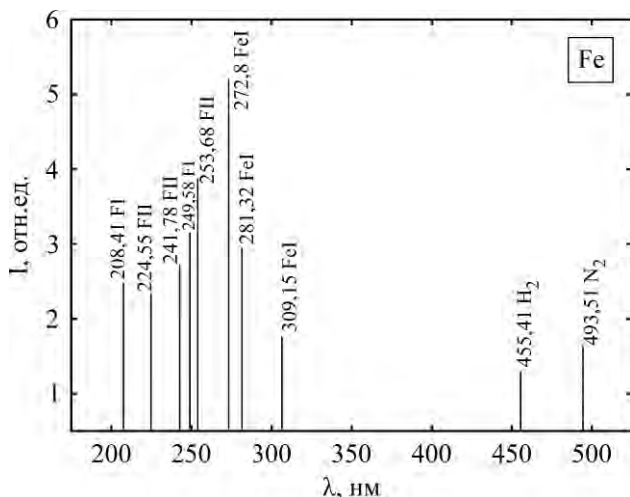


Рис. 4. Спектр излучения плазмы наносекундного разряда в воздухе между электродами из нержавеющей стали (при $f = 40$ Гц).

Расшифровка спектров излучения плазмы железа показала, что при разряде между электродами из нержавеющей стали доминируют спектральные линии атомов и однозарядных ионов железа, а наиболее интенсивной была спектральная линия 249,6 нм Fe I. Наши результаты хорошо согласуются с

соответствующими спектрами излучения высоковольтного субнаносекундного разряда в воздухе атмосферного давления для системы электродов типа «иголка-плоскость» [17].

Параметры плазмы наносекундного разряда для смеси паров меди и воздуха при атмосферном давлении (соотношение компонент 30 Па:101 кПа соответственно) определялись численно и рассчитывались как полные интегралы функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). ФРЭЭ находились численно путем решения кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении. Расчеты ФРЭЭ проводились с использованием программы [18]. На основе полученных ФРЭЭ определены средняя энергия электронов, подвижность электронов. Соотношение концентраций паров меди и концентраций газов стандартной атмосферы при давлении 101 кПа аргона, углекислого газа, кислорода, азота было следующим: 0.3:7:0.27:159:599. Расчеты проводились в зависимости параметров плазмы от величины приведенного электрического поля (отношения напряженности электрического поля (E) к общей концентрации атомов меди, аргона и молекул углекислого газа, кислорода и азота (N)). Диапазон изменений параметра $E/N = 1-1300$ Тд ($1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15}$ В·см²) включал величины параметра E/N , которые были реализованы в эксперименте.

В интеграле столкновений электронов с атомами и молекулами учтены следующие процессы: упругое рассеяние электронов на атомах меди; возбуждение энергетических уровней атомов меди (энергии порога 1,500 эВ, 3,800 эВ, 5,100 эВ); ионизация атомов меди (энергия порога 7,724 эВ); упругое рассеяние электронов на атомах меди; возбуждение энергетического уровня атомов аргона (энергия порога 11,50 эВ); ионизация атомов аргона (энергия порога 15,80 эВ); упругое рассеяние и возбуждение энергетических уровней молекул углекислого газа: колебательных (энергии порога 0,083 эВ, 0,167 эВ, 0,252 эВ, 0,291 эВ, 0,339 эВ, 0,422 эВ, 0,505 эВ, 2,5 эВ), электронных (энергии порога: 7,0 эВ, 10,5 эВ); диссоциативное прилипание электрона (энергия порога 3,85 эВ); ионизация (энергия порога 13,30 эВ); упругое рассеяние и возбуждение энергетических уровней молекул кислорода: колебательных (энергии порога 0,190 эВ, 0,380 эВ, 0,570 эВ, 0,750 эВ), электронных (энергии порога 0,977 эВ, 1,627 эВ, 4,500 эВ, 6,000 эВ, 8,400 эВ, 9,970 эВ); диссоциативное прилипание электрона (энергия порога 4,40 эВ), ионизация (энергия порога 12,06 эВ); упругое рассеяние и возбуждение энергетических уровней молекул азота: вращательного (энергия порога 0,020 эВ), колебательных (энергии порога 0,290 эВ, 0,291 эВ, 0,590 эВ, 0,880, 1,170, 1,470, 1,760, 2,060, 2,350), электронных (энергии порога 6,170 эВ, 7,000, 7,350, 7,360, 7,800, 8,160, 8,400, 8,550, 8,890, 11,03, 11,87, 12,25, 13,00), ионизация (энергия порога 15,60 эВ). Данные по абсолютным величинам эффективных сечений этих процессов, а также их зависимостей от энергий электронов взяты из базы данных [18].

Концентрация электронов (N_e) рассчитывалась по известной формуле [19]:

$$N_e = j / e \cdot V_{др.},$$

где j – плотность тока в разряде; e – заряд электрона; $V_{др.}$ – скорость дрейфа электронов.

Скорость дрейфа электронов определялась из выражения:

$$V_{др.} = \mu_e \cdot E,$$

где μ_e – подвижность электронов; E – напряженность поля на плазме.

Напряженность поля на плазме E рассчитывалась по формуле:

$$E = U_{пл.} / d,$$

$U_{пл.}$ – напряжение на плазме; d – величина разрядного промежутка.

Средняя энергия электронов разряда наиболее сильно зависит от параметра $E/N = 1-400$ Тд, при

этом она линейно увеличивается от 0,15 до 8,77 эВ. В диапазоне параметра $E/N = 400-1300$ Тд средняя энергия электронов также увеличивается от 8,77 до 29,26 эВ, но с меньшей скоростью. Для диапазона приведенной напряженности электрического поля 615 Тд – 820 Тд, при котором проводились экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик разряда, средние энергии электронов изменялись в пределах 12,6–16,5 эВ. А их наибольшие энергии соответствовали величинам 177–300 эВ.

Результаты расчета средних энергий электронов позволяют определить их температуру в газоразрядной плазме излучателя по известной формуле [19]:

$$\varepsilon = 3/2 \cdot kT,$$

где ε – энергия электронов; k – постоянная Больцмана; T – температура в градусах Кельвина.

Она увеличивается от 146160 до 191400 К при изменении параметра E/N от 615 до 820 Тд соответственно.

Подвижность электронов, как следует из данных численного расчета, изменяется в пределах $1,1130 \cdot 10^{24} \cdot N - 1,031 \cdot 10^{24} \cdot N$ (1/м/В/с) при изменении параметра E/N в диапазоне 615 Тд – 820 Тд, что дает значения скорости дрейфа электронов $6,8 \cdot 10^4$ и $8,4 \cdot 10^4$ м/с соответственно для напряженности поля на плазме $15,0 \cdot 10^6$ и $20,0 \cdot 10^6$ В/м, значение концентрации электронов $70,3 \cdot 10^{21} - 56,9 \cdot 10^{21}$ м⁻³ при плотности тока $765 \cdot 10^6$ А/м² на поверхности электрода источника излучения ($0,196 \cdot 10^{-6}$ м²).

В условиях настоящего эксперимента основным механизмом попадания в плазму паров цинка, меди и железа является эктонный (взрыв микроострий на поверхности электродов), при котором плотность электронов в разряде может достигать $10^{16}-10^{17}$ см⁻³ [20]. Поэтому важный вклад в механизм образования возбужденных атомов и ионов переходных металлов могут вносить процессы возбуждения ионов металла в основном состоянии электронами, а также процессы электрон-ионной рекомбинации. Эффективные сечения этих процессов, например для ионов цинка и кадмия, достаточно велики и достигают 10^{-16} см² [21].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИНКА, МЕДИ И ЖЕЛЕЗА

Рассмотрим основные результаты исследования характеристик наноструктур на основе оксидов цинка, меди и железа, которые осажда-

лись на стеклянную подложку вблизи разрядного промежутка.

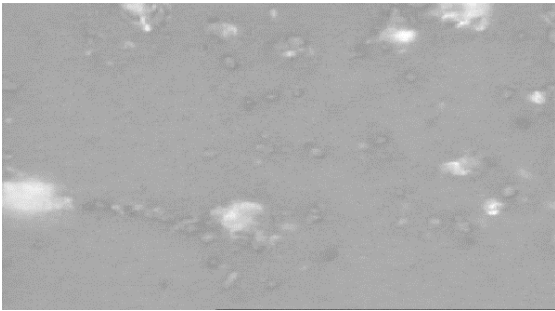


Рис. 5. Структура поверхности пленки, синтезированной на стеклянной подложке из продуктов распыления медных электродов в воздухе атмосферного давления за 30 минут под действием сильноточного наносекундного разряда ($d = 1$ мм и $f = 100$ Гц).

На рис. 5 представлена фотография поверхности пленки, осажденной на стеклянную подложку из продуктов эрозии медных электродов и продуктов диссоциации молекул воздуха в перенапряженном наносекундном разряде. Все исследования синтеза и оптических характеристик пленок проводились при межэлектродном расстоянии 1 мм. Для определения размеров наноструктур на поверхность пленки наносился гель на основе стандартных наноструктур золота сферической формы диаметром 20 нм (они выделяются на цветных фотографиях желтым цветом). Сравнительный анализ размеров сферических наноструктур золота и наноструктур, синтезированных из продуктов перенапряженного наносекундного разряда между медными электродами в воздухе, показал, что размеры синтезированных наноструктур находятся в диапазоне 2–20 нм. Поперечные размеры наноструктур на основе оксида цинка находились в диапазоне 2–50 нм, но при этом наблюдалось и образование крупных агломератов цинка с размерами 1–10 мкм. При увеличенном давлении воздуха и высокоэнергетической плазме (при использовании для синтеза наноструктур наносекундных разрядов в жидкости или воздухе) наблюдается преимущественное образование нановискеров или наноструктур оксидов переходных металлов более сложной формы [22]. Это было подтверждено при исследовании спектров рамановского рассеяния лазерного излучения с длиной волны 514,5 нм наноструктурами оксидов цинка и меди, синтезированных в исследуемом разряде, и сравнением их с соответствующими рамановскими спектрами нановискеров других исследователей. Так, в работе [22] наностолбики оксида цинка были получены в результате действия мощного газоразрядного лазера на молекулах KrF , который излучал на длине волны 248 нм на поверхность керамической мишени из ZnO .

Как видно из [23], зарегистрированный нами спектр рамановского рассеяния излучения Ag^+ – лазера хорошо коррелируется с соответствующим спектром, полученным в [22], где исследовалось рамановское рассеяние излучения такого же лазера на наностолбиках оксида цинка диаметром 8–35 нм. Поэтому можно считать, что и в условиях исследуемого наносекундного разряда происходит синтез наностолбиков оксида цинка, которые расположены перпендикулярно к поверхности подложки из стекла, без применения переходных покрытий с зародышами.

На рис. 6 приведен спектр пропускания наноструктур оксидов меди. Пропускание таких пленок увеличивалось с удлинением волны в видимой области спектра и имело вид континуума без максимумов и минимумов в диапазоне от 500 до 650 нм. Полученные результаты неплохо коррелируются со спектром пропускания наноструктур закиси меди (Cu_2O) [23]. Полоса поглощения пленки в интервале длин волн 550–580 нм соответствует полосе поглощения наноструктур меди [24]. Узкие полосы просветления пленок в синей области спектра (при длинах волн 420 и 450 нм) связаны, вероятно, с действием ультрафиолетового излучения разряда в спектральном интервале 200–230 нм на пленку в процессе ее синтеза. Такие же полосы просветления наблюдались и для пленок на основе оксида цинка. Причиной появления данных полос просветления могут быть радиационные дефекты пленок оксидов меди и цинка, а также формирование новых энергетических уровней в этих соединениях. Наиболее интенсивными были полосы пропускания наноструктур на основе оксидов цинка и меди, что коррелировалось с селективным и интенсивным излучением плазмы паров цинка и меди в спектральном интервале 200–230 нм. При наносекундном разряде между электродами из нержавеющей стали селективность и интенсивность излучения плазмы уменьшались, что приводило к сокращению интенсивности полос пропускания в синей области спектра для наноструктур на основе оксидов железа [25, 26].

Спектры фотолюминесценции наноструктур на основе оксида цинка при длинах волн возбуждения в диапазоне 270–550 нм приведены на рис. 7. Фотолюминесценция исследуемых наноструктур была наиболее эффективной под действием излучения с длиной волны 330 нм. Фотолюминесценция наноструктур в УФ области практически отсутствовала, а в видимой области она характеризовалась двумя широкими максимумами в интервалах длин волн 450–480 и 650–680 нм. Согласно данным [27], основной

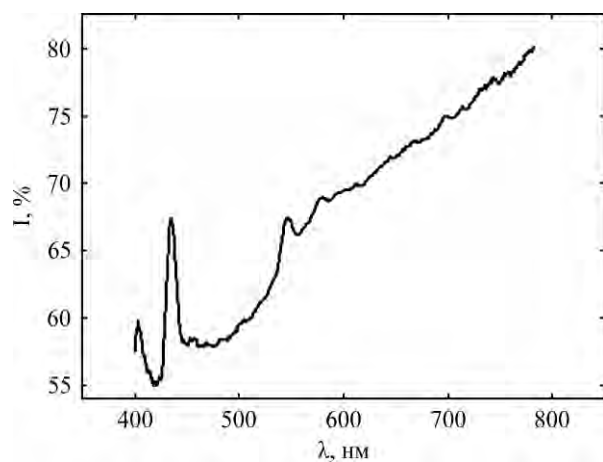


Рис. 6. Спектр пропускания излучения в центре пленки, полученной при распылении медных электродов в воздухе на протяжении 30 минут ($d = 1$ мм и $f = 100$ Гц).

механизм фотолюминесценции наноструктур оксида цинка в зеленой области связан с нейтральными вакансиями кислорода, а в красной области фотолюминесценция определяется остаточной примесью лития. При увеличении длины волны возбуждения люминесценции в видимую область спектра (до 550 нм) спектры фотолюминесценции тоже сдвигались в длинноволновую область, а интенсивность фотолюминесценции значительно уменьшалась. При уменьшении длины волны возбуждения с 330 до 270 нм интенсивность люминесценции уменьшалась наиболее существенно для зеленой и красной полос.

ВЫВОДЫ

Установлено, что перенапряженный наносекундный разряд в воздухе атмосферного давления между электродами из переходных металлов (Zn, Cu) является селективным источником излучения атомов и ионов цинка и меди в спектральном диапазоне 200–230 нм, а для электродов из нержавеющей стали излучение плазмы наблюдалось в спектральном интервале 200–250 нм; одновременно плазма является источником потоков молекул и кластеров разного состава на основе оксидов переходных металлов, что может найти применение в микробиологии, медицине и агротехнологиях; при автоматическом ассистировании ультрафиолетовым излучением плазмы на подложках из стекла синтезированы тонкие наноструктурированные пленки оксидов цинка и меди, характеризующиеся окнами прозрачности в синей области спектра, что может быть использовано в оптоэлектронике.

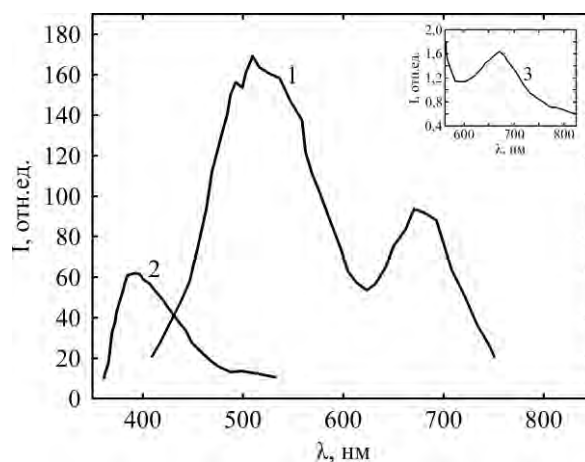


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции тонкой пленки, синтезированной при распылении цинковых электродов в наносекундном разряде в воздухе, полученные при возбуждении излучением ртутной лампы на длинах волн: 270 (1); 330 (2) и 550 (3) нм.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Роману Голомбу за помощь в исследовании оптических характеристик наноструктур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахарьков Г.П. *Биомедицинская инженерия: проблемы и перспективы*. СПб.: Политехника, 2011. 232 с.
2. Василяк Л.М. *ЭОМ*. 2009, **45**(1), 30–40.
3. Шуаибов О.К., Грицак Р.В. *Ультрафіолетові лампи на радикалах гідроксилу та ексиплексних молекулах з накачуванням бар'єрним наносекундним розрядом*. Монографія. Ужгород: ДВНЗ Видавництво «Говерла». 2018. 114 с.
4. Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. *Письма в ЖТФ*. 2018, **44**(2), 104–110.
5. Панов В.А., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Дешева Е.А. и др. *Прикладная физика*. 2017, (5), 25–30.
6. Шуаибов А.К., Миня А.Й., Гомоки З.Т., Данило В.В. и др. *ЭОМ*. 2018, **54**(1), 46–50.
7. Shuaibov A., Minya A., Malinina A., Malinin A. et al. *Adv Nat Sci Nanosci Nanotechnol*. 2018, **9**, 035018 (7 pp).
8. Шуаибов О.К., Миня О.Й., Гомоки З.Т., Данило В.В. *Спосіб наноструктурування поверхні скла в повітрі атмосферного тиску*. Україна патент на корисну модель. УК пат. 05112, 2017. Бюл. № 21. 6 с.
9. Егорова Е.М. *Биологические эффекты наночастиц металлов*. М.: Наука, 2014. 350 с.
10. Затолокин В.Д., Мошкин А.С. *Вестник экспериментальной и клинической хирургии*. 2010, **3**(1), 44–51.
11. Шут В.Н., Мозжаров С.Е., Янченко В.В. *Химическая технология и экология. Вестник*

- Витебского государственного технологического университета*. 2016, **31**(2), 97–105.
12. Chung S.H., Hoffman A. and Bader S.D., Liu C. et al. *Appl Phys Lett*. 2004, **85**(14), 2971–2973.
 13. Rozhkova E.A., Novosad V., Kim D.H., Pearson J. et al. *J Appl Phys*. 2009, **105**, 07B306 3 pp.
 14. Шуаібов О.К., Миня О.Й., Гомоки З.Т., Данило В.В. *Безвіконна, точкова, ультрафіолетова лампа*. Україна патент на корисну модель. U 2016 04596, 2016. Бюл. № 21. 6 с.
 15. Shuaibov A., Mynia O., Chuchman M., Homoki Z. et al. *Proceedings of the XIII International Conference "Electronics and Applied Physics"*. Kyiv. Ukraine, October 24–27, 2017. p. 151–152.
 16. Shuaibov O.K., Mynya O.Y., Chuchman M.P., Malinina A.A. et al. *Ukr J Phys*. 2018, **63**(9), 790–801.
 17. Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2011, **54**(11), 91–94.
 18. <https://nl.lxcat.net/solvers/BOLSIG+/>
 19. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
 20. Mesyats G.A. *Usp. Fizich. Nauk*. 1995, **38**, 567–590.
 21. Ovcharenko E.V., Imre A.I., Gomonai A.N., Hutych Yu.I. *J Phys B Atom Mol Opt Phys*. 2010, **43**(17), 230–234.
 22. Кайдашев В.Е., Кайдашев Е.М., Peres M., Monteiro T. и др. *ЖТФ*. 2009, **79**(11), 45–49.
 23. Заманова Э.Н., Алиева Л.А. *Fizika*. 2008, **XIV**(3), С. 194–196.
 24. Фарманфармас Б., Рашидиан Вазири М.Р., Хаджиисмаилбаижи Ф. *Квантовая электроника*. 2014, **44**(11), 1029–1032.
 25. Shuaibov A.K., Mynya A.Y., Malinina A.A., Malinin A.N. et al. *Am J Mech Mater Eng*. 2018, **2**(1), 8–14.
 26. Рутберг Ф.Г., Гусаров В. В., Коликов В.А., Воскресенская И.П. и др. *ЖТФ*. 2012, **82**(12), 33–36.
 27. Рудный П.А., Черненко К.А., Веневцев И.Д. *Оптика и спектроскопия*. 2018, **125**(3), 357–363.

Summary

The characteristics of an overstressed, high-current nanosecond discharge in atmospheric air between zinc, copper, and iron electrodes are given, with a distance between the electrodes of 1–3 mm. It is established that this discharge is a point source of ultraviolet radiation in the spectral range of 200–300 nm and a stream of nanoparticles of zinc, copper, and iron oxides. The results of optimization of the UV emitter depending on the pumping conditions and parameters of the discharge medium, as well as the optical characteristics of the film nanostructures of transition metal oxides deposited on the surface of a glass substrate are presented.

Keywords: high-current nanosecond discharge, zinc, copper, iron, air, emission and transmission spectrum, metal oxide nanostructures, photoluminescence.