

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

А.В. Аванесов, Д.Г. Волошин, Д.Г. Дамбраускас, А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

**ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА
НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СХЕМ**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2006 –20/819

Москва – 2006 г.

УДК 621.3.032.35

Preprint of Institute of Nuclear Physics № 2006-20/819

A.V. Avanesov, D.G. Voloshin, S.G. Dambrauskas, A.T. Rakhimov, V.B. Saenko
E-mail: Vsaenko@mics.msu.su

**EXPERIMENTAL SAMPLES OF THE UV-RADIATION AND OZONE BASED ON
VARIOUS GAS DISCHARGE SCHEMES**

Abstract

Experimental samples of open and lamp sources of UV radiation based on different schemes of pulse-periodic gas discharge have been designed and created. Various modifications of multi-gap strong current short lasting discharges (RCL-discharge scheme with a switch, RCL-discharge scheme by Arkadyev-Marx, RCL-discharge scheme ignited by special sectioned capacitive discharge, dual-discharge scheme) have been used. New source of UV-radiation and ozone based on barrier discharge with a new electrode construction has been offered, as well as mini ozonator based on sectioned capacitate discharge. Parameters of various UV and ozone radiations have been examined and optimized. These sources of UV radiation and ozone are very promising for creation of new UV/ozone technologies and using them in microelectronics, laser technique, medicine and ecology.

The investigation is executed by support grants RFBR № 05-08-18032 and SS-7101.2006.2.

А.В. Аванесов, Д.Г. Волошин, Д.Г. Дамбраускас, А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

**ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА
НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СХЕМ**

Аннотация

Разработаны и созданы опытные образцы открытых и ламповых источников УФ излучения на основе различных схем импульсно-периодического газового разряда. Используются различные модификации многозазорных сильноточных разрядов короткой длительности (RCL - разрядные схемы с коммутатором, RCL - разрядные схемы, собранные по схеме Аркадьева-Маркса, RCL - разрядные схемы с поджигом от автономного секционированного емкостного разряда, т.е. схема с двойным разрядом). Предложен новый источник УФ или озона на основе барьерного разряда с новой структурой электродов, а также миниозонатор на основе секционированного емкостного разряда. Исследованы характеристики и проведена оптимизация ряда конструкций источников УФ и озона. Предлагаемые источники УФ и озона перспективны при создании УФ/озонных технологий в микроэлектронике, лазерной технике, медицине и экологии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-08-18032 и НШ-7101.2006.2.

© Аванесов А.В., Волошин Д.Г., Дамбраускас С.Г.,
Рахимов А.Т., Саенко В.Б., 2006

© НИИЯФ МГУ, 2006 <http://www.sinp.msu.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение.....	4
2.	Газоразрядные источники коротковолнового УФ излучения.....	4
3.	Газоразрядные источники озона.....	13
4.	Заключение.....	20
5.	Литература.....	21

1. Введение

Развитие науки и техники сопровождается постоянным поиском новых технологических процессов. Большие потенциальные возможности связаны с использованием коротковолнового УФ излучения и газа-реактента, в частности, озона [1-7]. Благодаря исследованиям в области физики плазмы и микроэлектроники обнаружены новые свойства озono-кислородных смесей, воздействующих на вещество в комбинации с УФ облучением. В ультрафиолетовом спектре озон имеет широкую интенсивную полосу поглощения в интервале 90 – 300 нм с максимумами вблизи 140 и 255 нм (полоса Хартли). УФ инициирует реакцию разложения озона на атомы и возбужденные молекулы кислорода, вызывая образование радикалов. Можно подобрать такие технологические режимы, при которых время обработки различных веществ может резко сократиться [2,5]. Именно поэтому, ведущие научные и инженерные центры достаточно активно исследуют и разрабатывают различные газоразрядные системы генерации УФ излучения и электросинтеза озона. Примером может служить активная деятельность в этом направлении такой известной электротехнической фирмы, как ABB [2].

Генерация УФ и электросинтез озона являются достаточно высокоэнергетическими процессами, поэтому в настоящее время УФ/O₃-технология находит ограниченное применение в микроэлектронике, медицине и экологии. В значительной мере развитие УФ/O₃-технологии зависит от наличия эффективных, надежных и не слишком дорогих источников УФ и озона. В данной работе дается описание импульсно-периодических источников УФ и озона, которые соответствуют этим требованиям и могут найти применение при создании новых фотохимических и фотофизических технологий во многих отраслях науки и техники.

2. Газоразрядные источники коротковолнового УФ излучения

RCL – многозазорный скользящий разряд, управляемый коммутатором. Наиболее простым и достаточно эффективным источником коротковолнового УФ излучения являлся многозазорный скользящий разряд, рис.1-2., допускающий плотность расположения искр на поверхности порядка 1 см^{-2} . На фольгированном медью стеклотекстолите формировалась цепочка электродов с зазорами $b \leq l$ мм и количеством $n = 10 - 50$ шт., расположенных с шагом 10 мм. Цепочка электродов с обратным токопроводом через управляемый разрядник подключалась к накопительной емкости $C = 2,5 - 100$ нф, заряжаемой до напряжения $U = 10 - 20$ кВ. Изучалось влияние параметров RCL -контура на эффективность УФ излучения в заданном спектральном интервале. В зависимости от величины C формировался одиночный или пульсирующий разряд с частотой до $f = 20$ кГц.

В более ранних экспериментах было отмечено, что коротковолновый ультрафиолет отсутствовал в случае, когда длительность разрядного тока превышала 1 мкс. Оценки показали, что первоначально плазма внутри канала может быть равновесно нагрета до температуры порядка $T = 1 - 5$ эВ. В дальнейшем плазма остывала за счет разлета. Характерное время разлета, которое должно соответствовать длительности излучения коротковолнового УФ излучения, можно определить как $t = r/v = 10^{-6}$ с, здесь v - скорость звука в нагретом газе, r - радиус шнура. Привлечение такого механизма генерации УФ излучения позволило понять отсутствие УФ в течение второго полупериода

колебаний тока излучающего разряда, так как ток протекает по уже расширившемуся каналу и не может сколько-нибудь существенно увеличить температуру плазмы. Отсюда следовало, что необходимо использовать аperiodическую форму разряда с крутым фронтом тока, чтобы обеспечить максимальный энергоклад за время ее разлета и обеспечить высокую энергетическую эффективность разряда. Такой режим был достигнут за счет оптимизации количества щелевых разрядных промежутков, величины разрядного зазора и соответствующего выбора параметров RCL – разрядного контура, рис.3.

При использовании скользящих разрядов, работающих в атмосфере азота и аргона, были получены достаточно интенсивные потоки фотонов с энергией порядка 10 эВ при аperiodической форме разряда с длительностью импульса тока $t \leq 1$ мкс и скорости нарастания тока $di/dt \approx U_1/eL \approx 10^9$ А/с. Следует отметить, что создавая низкоиндуктивные разрядные контуры можно повысить скорость энергоклада и получить более коротковолновое УФ излучение. За счет оптимизации электрических параметров можно управлять как спектральным составом излучения, так и его интенсивностью.

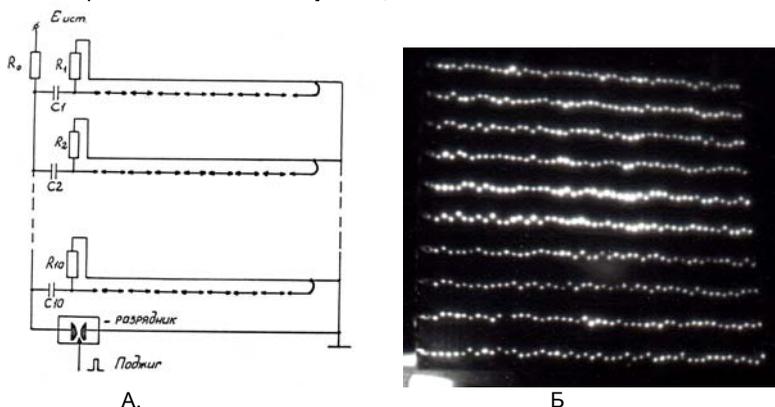


Рис.1. Матрица скользящих разрядов. А – электрическая схема, Б – свечение матрицы скользящих разрядов, образованных 10 дорожками длиной 50 см.

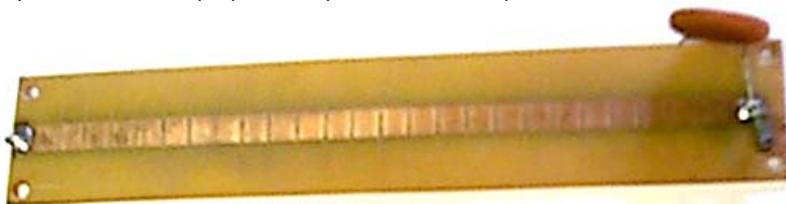


Рис.2. Линейный УФ излучатель на основе многозазорного скользящего разряда. 20 искровых промежутков с разрядным зазором порядка 0,5 мм и линейной плотностью 1 см^{-1} .

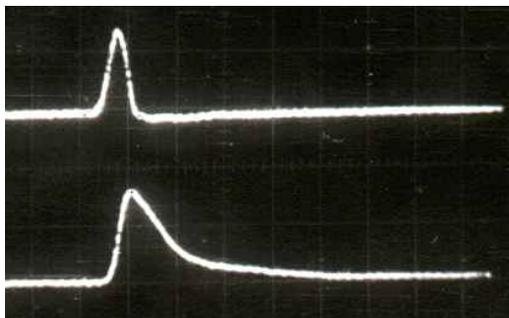


Рис.3. Характерные осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и интенсивности УФ излучения ($\Delta\lambda=110-250$ нм, нижний луч). Развертка 1мкс/дел, амплитуда тока порядка 1 кА.

Экспериментально такая возможность продемонстрирована в работе [7], в которой зарегистрированы фотоны с энергией $E_{\text{ф}} = 8-70$ эВ ($I_{\text{max}} - 250$ кА). В экспериментах со скользящим разрядом при рассогласовании RCL - контура и появлении колебаний тока, а также при повышении длительности разряда $t \geq 1$ мкс эффективность УФ излучателя резко ухудшалась. RCL - схемы излучающего разряда с последовательно включенным коммутатором (разрядник или водородный тиратрон ТГИ-1000/25) не могли обеспечить индуктивность меньше 0,5 мкГн. Были предложены и исследованы новые схемы организации излучающего разряда, которые позволили на порядок снизить паразитную индуктивность.

В настоящее время разработаны схемы организации излучающего разряда, которые позволили резко снизить паразитную индуктивность: а) за счет применения модифицированной схемы Аркадьева-Маркса, рис. 4-10; б) за счет использования схемы двойного разряда, когда вся матрица разрядных промежутков предварительно ионизируется, рис.11-17.

Источники УФ излучения на основе RCL – разрядной схемы Аркадьева-Маркса. Применение RCL -разрядной схемы с последовательно включенным коммутатором обладает рядом недостатков. На коммутаторе рассеивается до 20% запасенной энергии. При увеличении масштабов УФ излучателя его частотные характеристики в импульсно-периодическом режиме ограничены предельными параметрами коммутирующей аппаратуры. Кроме того, паразитная индуктивность коммутатора может затруднить реализацию аperiodического режима разряда. Схема Аркадьева-Маркса [1] позволяет осуществить сборку многозарядного излучающего разряда последовательно с емкостными накопителями энергии при использовании параллельной зарядки емкостей от источника постоянного тока. При напряжении выше пробойного значения частота следования импульсов излучающего разряда зависит от тока зарядки и может достигать значений порядка 10-100 кГц. Использование компактных низкоиндуктивных емкостей позволило достаточно легко обеспечить аperiodический режим разряда с длительностью порядка 10 –100 нс при энерговкладе в отдельный микрошнур плазмы порядка 1 - 20 мДж. Опытные образцы УФ излучателей представлены на рис.4-7.



Рис.4. Опытные образцы источников УФ на основе сильноточного RCL - разряда короткой длительности, представляющего собой схему Аркадьева-Маркса. Источником питания служит стандартный высоковольтный выпрямитель, частота следования импульсов УФ излучения определяются величиной тока и может регулироваться в пределах $F = 1 - 10^5$ Гц при энерговкладе в отдельный микрошнур плазмы $W = 1 - 10^{-4}$ Дж и длительности УФ излучения порядка 0,1 – 1 мкс.



А.



Б.



В.

Рис.5. Свечение разряда при работе в окружающем воздухе. А. - линейный источник УФ (N=10). Б. – кольцевой источник (N=18) . В. – плоский источник УФ (N=9).

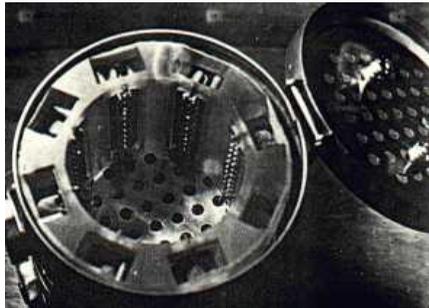


Рис.6. Экспресс-стерилизатор стоматологического инструментария на базе медицинской коробки КФ-3 (проект). Импульсно-периодический источник УФ (180-300 нм). Длительность вспышки УФ – 1 мкс, частота следования – 1 кГц, потребляемая мощность – 180 Вт. Время обеззараживания порядка 10 сек.



Рис.7. Опытные образцы точечного (А.) и кольцевого (Б.) источников УФ, изготовленные в НТЦ «МИТ», ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (С.-Петербург) при выполнении совместных НИОКР.

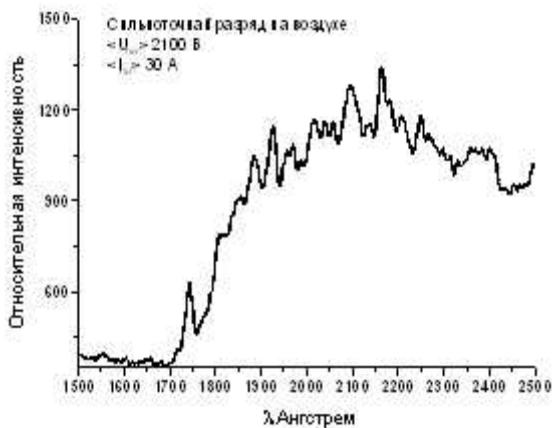


Рис.8. Характерный спектр излучающего разряда при работе источника УФ в окружающем воздухе.

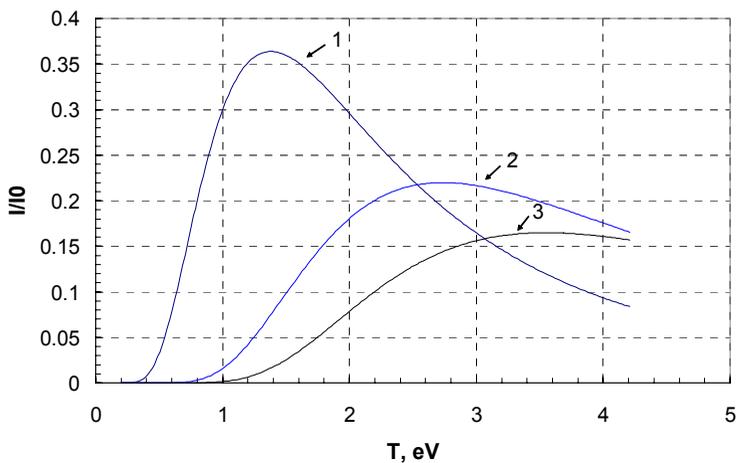


Рис.9. Доля УФ излучения в зависимости от температуры теплового источника для следующих спектральных диапазонов: 1. $\Delta\lambda=180-300$ нм (бактерицидное воздействие УФ излучения, $T_{\text{опт}} = 1,4$ эВ), 2. $\Delta\lambda=100-135$ нм (фотоионизация лазерной присадки NO, $T_{\text{опт}} = 2,5$ эВ), 3. $\Delta\lambda=80-100$ нм (фотоионизация Хе, $T_{\text{опт}} = 3,5$ эВ).

Источники УФ излучения на основе комбинированного (двойного разряда). Комбинированный (двойной) разряд, рис.10, реализован при подключении матрицы микроразрядных щелевых промежутков к низкоиндуктивному емкостному накопителю энергии, при этом барьерный (секционированный емкостной) разряд используется для предыонизации матрицы разрядных промежутков и, тем самым, импульсно-периодической коммутации сильноточного разряда короткой длительности. Новизна технического предложения состоит в разработке оригинальной катодной структуры, позволяющей накоротко подключить многоазорную цепочку электродов (соединенных последовательно или параллельно-последовательно) к емкостному накопителю энергии, при этом встроена структура изолированных вспомогательных электродов позволяет осуществить поджиг всех разрядных зазоров с использованием маломощной схемы барьерного разряда. Таким образом, реализован низкоиндуктивный RCL-разрядный контур для получения сильноточных разрядов короткой длительности для получения высокоинтенсивных импульсов ультрафиолетового излучения. Возможность использования многоазорной структуры и получения матрицы микроразрядов позволяет достаточно легко согласовать сопротивление излучающей плазмы с параметрами RCL-контра для получения эффективного режима быстрого энерговклада в разлетающуюся плазму. В такой схеме достаточно просто обеспечить значение параметра $dl/dt \geq 10^{10}$ A/c при аперийодической форме разрядного тока и напряжении ниже пробойного значения, что способствует достаточно эффективному преобразованию электрической энергии в УФ излучение. Такой УФ излучатель может иметь высокую интенсивность и работать при высоком давлении $p \geq 1$ атм при работе в окружающем воздухе или в атмосфере газового лазера (плазмохимического реактора). Возможен ламповый режим и генерация эксимерного излучения при соответствующем выборе газовой среды. Электродная структура с достаточно большим коэффициентом прозрачности позволяет помещать источник УФ в газовый поток, что может представлять интерес для фотохимических и фотофизических технологических установок. Разработан опытный образец источника УФ, рис.11-12. Напряжение основного RCL-разрядного контра составило величину порядка 5 кВ при зазоре 0,2 мм и последовательном соединении всех ($N = 90$) промежутков, рис.11. Геометрическая прозрачность для газового потока порядка 0,4. Для питания источника УФ необходимы два стандартных блока: выпрямитель с напряжением $U \approx 5$ кВ и током $I \approx 0,1$ А, а также маломощный генератор поджигающих импульсов с напряжением $U = 15 - 20$ кВ. Для поджигающего разряда, имеющего емкостную связь со всеми разрядными промежутками, использовалась схема на основе автомобильной катушки зажигания.

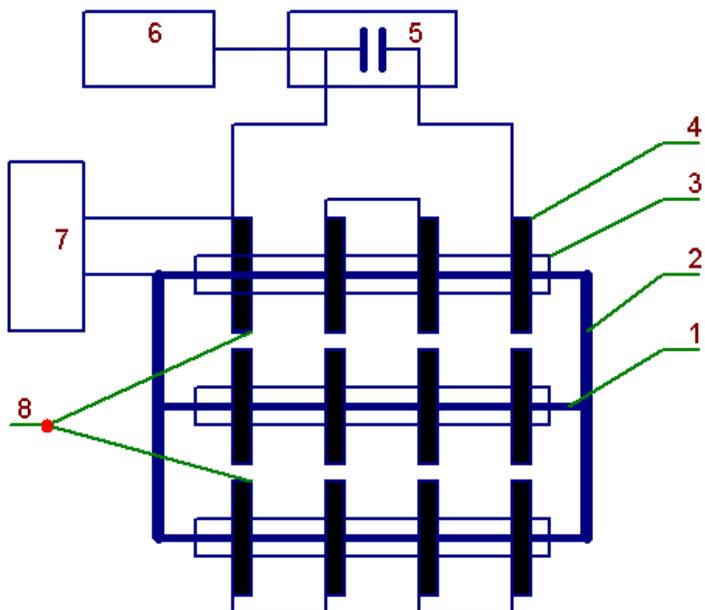


Рис.10. Принципиальная схема импульсно-периодического широкоапертурного источника УФ излучения на основе комбинированного RCL - сильноточного разряда короткой длительности: 1 - стержневые поджигающие электроды, 2 - металлическая пластина, 3 - диэлектрическая пленка – изолятор, 4 - кольцевые электроды, 5 - емкостной накопитель энергии, 6 - высоковольтный выпрямитель, 7- генератор поджигающих импульсов, 8 - щелевые разрядные промежутки.

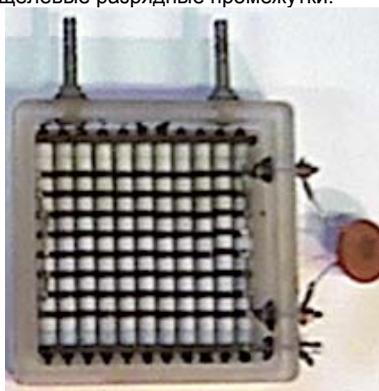


Рис.11. Опытные образцы источников УФ на основе комбинированного разряда. Плотность расположения матрицы микрошнуров плазмы 1 см^{-2} .

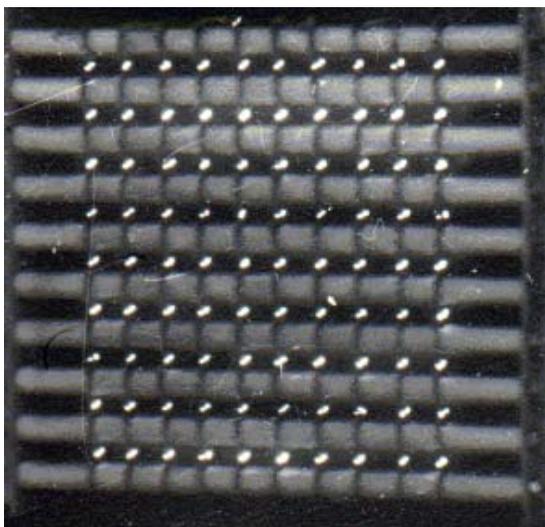


Рис.12. Свечение матрицы излучающих микрошнуров плазмы.

Физико-технические характеристики широкоапертурного источника УФ.

1. Модульная конструкция содержит матрицу разрядных промежутков $N = 90$ на площади $S = 10 \times 10$ см.
2. Схема организации разряда представляет собой двойной разряд, когда возможен режим барьерного разряда и последующее инициирование сильноточного разряда при подключении емкостного накопителя энергии.
3. Параметры плазмы могут изменяться от характеристик барьерного разряда до характеристик сильноточного разряда короткой длительности (Z-микроринч).
4. Режим работы источника плазмы определяется схемой питания барьерного разряда и может быть импульсно-периодическим с частотой до $F \sim 10^4$ Гц при длительности импульсов разряда $t < 1$ мкс и энерговкладе в отдельный разрядный промежуток $W < 0,1$ мДж.
5. В зависимости от частоты следования импульсов разряда потребляемая электрическая мощность составляет $10 - 450$ Вт без использования принудительного охлаждения.
6. Конструкция источника УФ обеспечивает возможность продувки рабочего газа сквозь матрицу разрядных промежутков.
7. Возможен набор источников УФ как по площади, так и в виде стопы для более эффективного взаимодействия с газовым потоком.

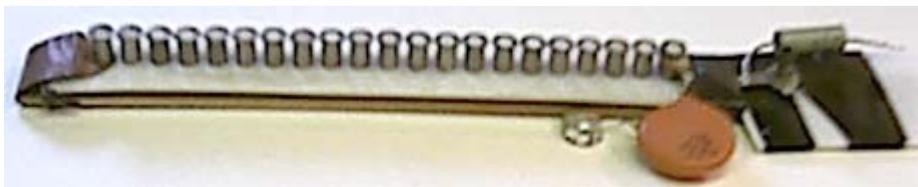


Рис. 13. Линейный источник УФ с двойным разрядом – УФ ионизатор для лазеров.

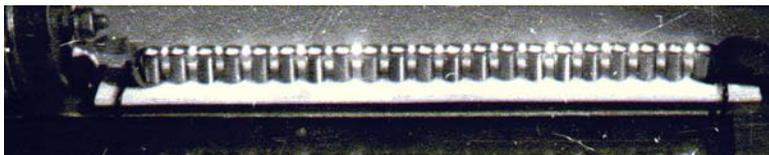


Рис.14. Свечение линейки излучающих микрошнуров плазмы.

3. Газоразрядные источники озона

Эксперименты проводились с разрядными ячейками двух основных геометрий: исследовалась разрядная ячейка плоской геометрии на основе секционированного емкостного разряда, рис.2, 3 и разрядная ячейка цилиндрической геометрии на основе барьерного разряда с новой структурой электродов, рис.4. В качестве блоков питания использовались импульсно-периодические источники знакопеременного напряжения на основе автомобильной катушки зажигания или на основе телевизионного строчного трансформатора. Формировались высоковольтные импульсы напряжения длительностью порядка 10-50 мкс, следующие с регулируемой частотой в пределах 0,5 – 10 кГц. Амплитуда напряжения могла регулироваться в пределах 3 – 10 кВ. Миниозонатор на основе секционированного тлеющего разряда мог работать от однополярных импульсов напряжения, которые генерировались электрической схемой на основе автомобильной катушки зажигания, что позволило создать компактный миниозонатор для работы от бортовой сети автомобиля.

Построение фигур Лиссажу в координатах $U - q$, и определение их площади позволяло определить величину активной энергии (E), выделившейся в разрядной системе за период изменения напряжения:

$$E = \oint_{\tau} I \times U dt = \oint_{\tau} U dq \quad (1)$$

Зная частоту (f) можно определить мощность, выделяемую в разрядной ячейке:

$$P = f \times E \quad (2)$$

Последний параметр является ключевым при описании кинетики синтеза озона в разрядных системах. На рис. 1,2 представлены характерные осциллограммы.

Для проведения синтеза озона из кислорода и контроля концентрации озона, использовалась система газоподготовки, позволяющая регулировать и контролировать поток рабочего газа и давление. В газовый тракт

установки была включена система измерения концентрации озона. Концентрация произведенного озона измерялась оптически, по поглощению в полосе Хартли (254 нм).

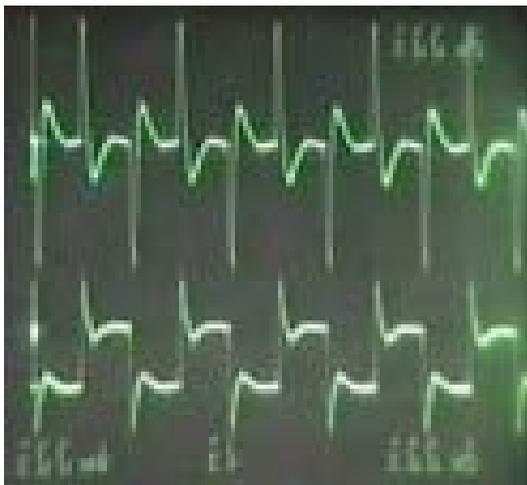


Рис.15. Характерные осциллограммы питающего напряжения (верхний луч) и заряда (нижний луч), полученные на экране осциллографа С1-91.

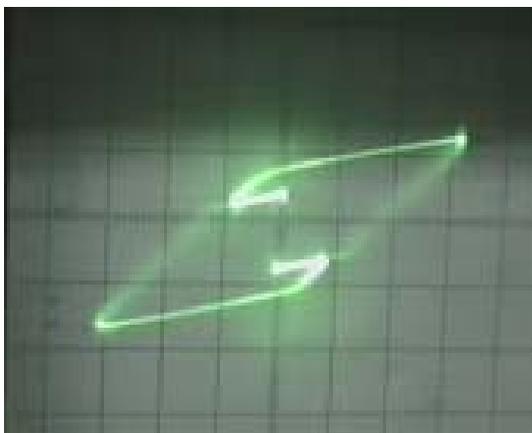


Рис.16. Характерная осциллограмма вольт-кулоновской характеристики барьерного разряда (фигура Лиссажу), полученная на экране осциллографа С1-82.

Секционированный тлеющий разряд. Электросинтез озона в барьерном разряде сопровождается повышенными тепловыми потерями в приэлектродных областях и диэлектрических покрытиях, поэтому продолжается поиск более совершенных схем организации газового разряда. Нами предложена и исследована схема организации секционированного тлеющего разряда для электросинтеза озона, которая находит применение для возбуждения лазерных сред, рис.6. Отличие состоит в том, что при электросинтезе озона использован щелевой разрядный промежуток. Газоразрядная камера миниозонатора представляла собой два плоских электрода с межэлектродным расстоянием $d = 0,8$ мм. Секционированный тлеющий разряд в потоке кислорода зажигался благодаря применению специальной электродной структуры. На пластине из фольгированного стеклотекстолита толщиной порядка 1 мм формировались точечные электроды диаметром 2 - 4 мм с плотностью расположения 3 - 10 см⁻² на площади размером 4x10 см. По сути, электродная структура представляла собой секционированный конденсатор; при этом одна из обкладок конденсатора выполнена сплошной (В), а другая - в виде матрицы электродов (А), расположенных на диэлектрической пластине, параллельной электроду С. Матрица А составляла с электродом С щелевой газоразрядный промежуток с зазором не более 1 мм. Сплошная обкладка конденсатора В подключалась к одной из клемм импульсно-периодического источника питания. Параметры диэлектрического слоя между электродами А и В подбирались так, чтобы соответствующая емкость в 10 и более раз превышала величину емкости газоразрядного промежутка. В этом случае, основная доля энерговклада и падения напряжения приходилась на разрядный промежуток. Отметим, что предлагаемая схема позволяла реализовать секционирование разряда при использовании электродов практически любых размеров и форм. В процессе экспериментов по электросинтезу озона исследовались как планарная, так и коаксиальная схемы газоразрядной камеры.

В результате исследований электросинтеза озона, были определены оптимальные параметры лабораторного озонатора, рис.6. Исследования проводились в прямоугольной газоразрядной камере с площадью электродов 4x10 см и зазором 0,8 мм. Электродная структура А содержала 7 x 17 точечных электродов диаметром 3 мм. При напряжении в первичной цепи автомобильного импульсного трансформатора $U_0 = 17$ В, озонатор работал в режиме естественного охлаждения и обеспечивал стабильные параметры по выходу озона при скорости прокачки кислорода не менее 5 л/час. Для этого режима получены следующие данные, характеризующие эффективность работы озонатора:

- Максимальная концентрация озона - 78 мг/л при протоке кислорода 5 л/час.
- Максимальный выход озона - 0,97 г/час при протоке кислорода 60 л/час.

При естественном охлаждении и температуре окружающей среды 20⁰ С озонатор обеспечивал постоянство параметров по генерации озона в течение 10 часов непрерывной работы при прокачке кислорода со скоростью более 5 л/час. В форсированном режиме при $U_0 = 19$ В параметры по выходу озона возросли, однако для их стабилизации требовалось внешнее охлаждение.

На рис. 19 представлены результаты по выходу озона при использовании источника знакопеременного напряжения на основе телевизионного строчного трансформатора. Характеристики миниозонатора при переходе к данной системе питания оказались несколько выше. Как видно из графика, как концентрацию, так и выход озона можно широко варьировать, как за счет изменения протока кислорода через разрядную ячейку, так и за счет

изменения параметров питающего напряжения. Максимальная концентрация достигала 100 мг/л, а максимальный выход озона 2.4 г/ч. При оптимальных условиях удельные энергозатраты на синтез озона в миниозонаторе с секционированными электродами практически соответствовали теоретическому значению и составили 4,5 Вт*час/г.

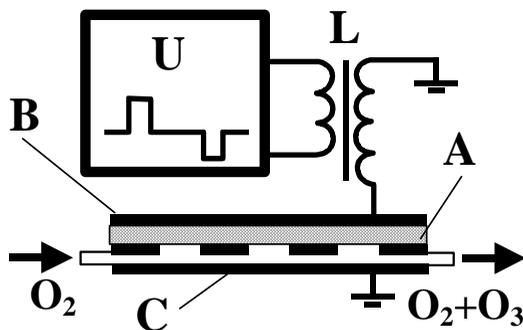


Рис.17. Принципиальная схема миниозонатора на основе секционированного емкостного разряда.

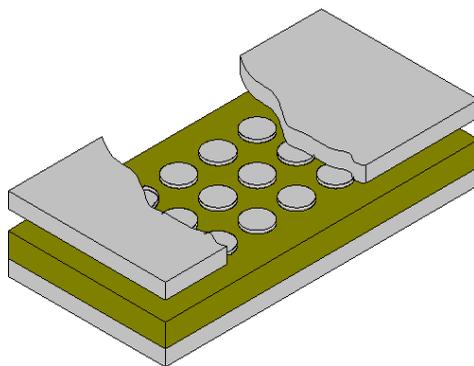


Рис.18. Газоразрядная камера миниозонатора на основе секционированного емкостного поперечного разряда при щелевом разрядном промежутке.

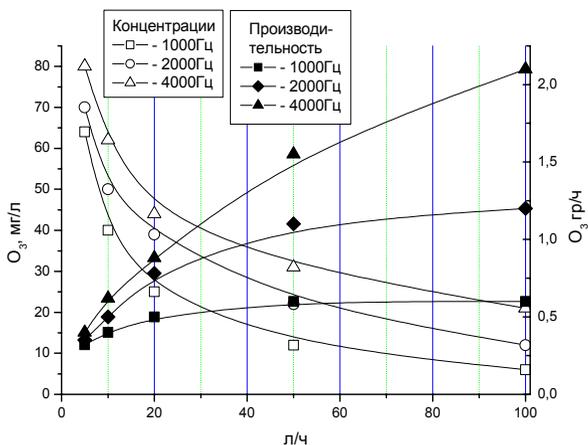


Рис.19. Концентрация озона и производительность озонатора в зависимости от объемного расхода кислорода.

Барьерный разряд. Эффективность электросинтеза озона в барьерном разряде достаточно высока, поэтому не прекращаются усилия по совершенствованию схем организации барьерного разряда за счет поиска оптимальной структуры электродов, покрытых диэлектриком. Нами предложен оригинальный способ организации барьерного разряда с повышенной плотностью микроразрядов за счет использования намотки двух изолированных проводников с практически нулевым разрядным промежутком в месте касания, рис.20,21. Два проводника могут быть намотаны на поверхности любых форм и размеров, что существенно облегчает возможности конструирования и масштабирования озонаторов и источников УФ на основе такого барьерного разряда. Проведены исследования электрических параметров барьерного разряда в ксеноне (генерация УФ) и кислороде (электросинтез озона) атмосферного давления. Площадь электродной структуры, размещенной в газовой камере с объемом 36 см³, составляла 60 см². Электрическая емкость электродной структуры составляла 150 pF. Электродная структура подключалась к источнику знакопеременного напряжения. Исследована энергетическая эффективность источников УФ и озона при изменении напряжения горения разряда в диапазоне 1 - 5 кВ и частоте следования импульсов в диапазоне 50 - 5000 Гц. При электросинтезе озона использовался проток кислорода при объемном расходе в диапазоне 0 - 200 л/час. Концентрация озона регистрировалась по поглощению УФ излучения (254 нм). В процессе экспериментов осциллографировались вольт-кулоновские характеристики разряда и регистрировались фигуры Лиссажу, что позволило определить энергетические характеристики разряда. Эффективность генерации УФ проверялась по яркости высвечивания люминофора "Zinc Silicate:Mn". Зарегистрирована яркость 130 кД/м³ при энергетической эффективности 1,5 лм/Вт. Отметим, что оптимизация режимов возбуждения люминофора не проводилась. При электросинтезе озона при комнатной

температуре получена концентрация озона до 80 мг/л, производительность по озону достигла 1,5 г/час, рис.5, энергетическая эффективность электросинтеза озона была близка к теоретическому пределу. При охлаждении колбы до 10 °С концентрация озона составила 140 мг/л при продувке порядка 1 л/час. Удельные энергозатраты на синтез озона в миниозонаторе на основе модифицированного барьерного разряда составили 6,5 Вт*час/г . При использовании инертного газа данную конструкцию можно эффективно использовать в качестве источника ультрафиолетового излучения. Эффективность генерации УФ проверялась при продувке Хе по яркости высвечивания люминофора "Zinc Silicate:Mn". Зарегистрирована яркость 130 кД/м² при энергетической эффективности 1,5 лм/Вт. Отметим, что оптимизация режимов возбуждения люминофора не проводилась.

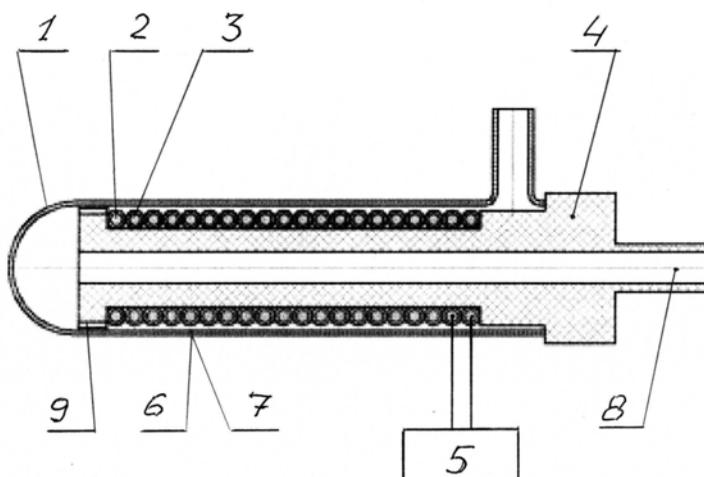


Рис. 20. Принципиальная схема устройства для возбуждения барьерного разряда в кислороде (электросинтез озона) или в излучающем газе (воздух, азот, инертные газы) для генерации УФ излучения: 1 – стеклянная колба (пробирка), 2,3 – два провода в диэлектрической оболочке, намотанные в виде катушки на стержень 4 и подключенные к источнику питания 5, 4 – диэлектрический стержень, 5 – источник переменного тока, 6 – щелевой промежуток порядка 1 мм, 7 – слой фотолюминофора при использовании устройства для генерации света заданной цветности, 8 – входной штуцер для продувки газа, 9 – отверстия для продувки газа.



Рис.21. Опытный образец источника УФ или озона на основе барьерного разряда с новой структурой электродов.

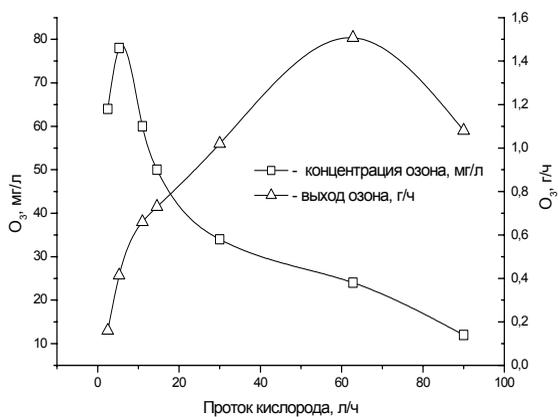


Рис.22. Концентрация озона и производительность озонатора в зависимости от объемного расхода кислорода.

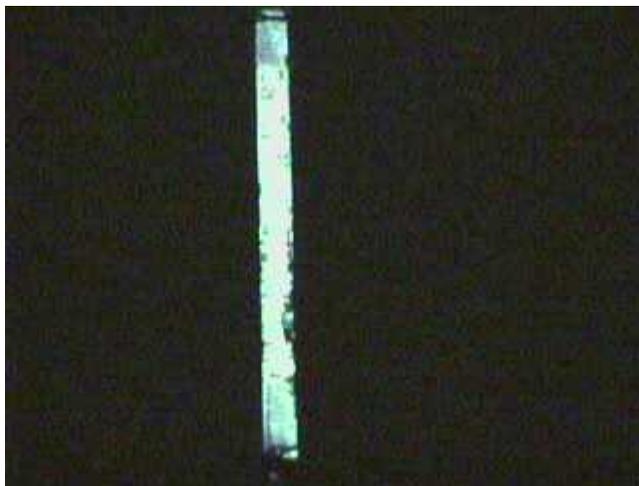


Рис.23. Свечение барьерного разряда при размещении электродной структуры в окружающем воздухе.

4. Заключение

Разработаны и созданы опытные образцы открытых и ламповых источников УФ излучения на основе различных схем импульсно-периодического газового разряда. Используются различные модификации многоазорных сильноточных разрядов короткой длительности (RCL-разрядные схемы с коммутатором, RCL-разрядные схемы, собранные по схеме Аркадьева-Маркса, RCL-разрядные схемы с поджигом от автономного секционированного емкостного разряда, т.е. схема с двойным разрядом). Предложен новый источник УФ или озона на основе барьерного разряда с новой структурой электродов. Исследованы характеристики и проведена оптимизация ряда конструкций УФ излучателей с различной формой излучающей поверхности (линейка, плоскость, кольцо, цилиндр). Проведен анализ и показана возможность создания УФ излучателей для фотоионизации присадок в лазерных средах, для использования в бактерицидных и фотохимических установках различного назначения.

В исследовательских и рекламных целях лабораторные образцы плазменных источников УФ использовались в технологиях нефтепереработки, при разработке фотоионизационных CO₂-лазеров, в службе санэпиднадзора. В настоящее время технология изготовления плазменных источников УФ освоена НИИЯФ МГУ, ОМЭ (Москва) и передана НТЦ «МИТ», ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (С-Петербург).

5. Литература.

1. Рабик Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике". Москва "Мир, 1985.
2. Vig J.R., Le Bus J.W."UV – Ozone Clearning of Surfaces"- IEEE Trans on Parts, Hybrids and Packaging. 1976. Vol.12, № 4, p. 365-370.
3. Элиассон Б., Г. Эсром Г., У. Когельшатц У. Новые УФ излучатели для промышленных применений. Обзор АББ, № 3, 1991, с. 21-28. (Kogelschatz U. et. al. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications. ICPIG XXIII, July 17 – 22, 1997, Toulouse, France).
4. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Бактерицидные установки для медицины на основе плазменных источников УФ и озона. - Конверсия, 1993, № 6, с.41-44.
5. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Физико-технические принципы экспресс-водоподготовки с использованием источников озона и ультрафиолета. Второй международный конгресс "Вода: экология и технология" (ЭКВАТЕК - 96), тезисы докладов, Москва, 1996. с.187.
6. А.Т. Рахимов, В.Б. Саенко. Газоразрядный источник ультрафиолетового излучения или озона. Патент РФ № 2285311 от 10.10. 2006. Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам, ФИПС, Москва, № 28, 2006, с.303.
7. J.R. Woodworth and P.F. McKay. J. Appl. Phys. 58(9), p. 3364.

**Алексей Вадимович Аванесов
Дмитрий Григорьевич Волошин
Станислав Георгиевич Дамбраускас
Александр Турсунович Рахимов
Владимир Борисович Саенко**

**ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА
НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СХЕМ**

Препринт НИИЯФ МГУ –2006 –20/819

Работа поступила в ОНТИ 20.12.2006 г.