

ИСТОЧНИК УФ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ ФОТОНОВ 7-15 эВ

Саенко В.Б.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.

Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

Москва, Россия

Saenko V.B.

UV SOURCE WITH ENERGY OF PHOTONS 7-15 eV

Moscow, Russia

Статья посвящена вопросам создания широкоапертурных источников коротковолнового УФ излучения на основе матрицы Z-микропинчей и краткому обзору их использования в фотофизических и фотохимических технологиях.

1. Введение

Интерес к разработке источников коротковолнового УФ излучения обусловлен бурным развитием фотохимических и фотофизических технологий в квантовой электронике, микроэлектронике, нефтехимии, медицине, экологии при очистке воды и воздуха, а также при фотосинтезе озона [1-7]. Генерация широкоапертурных фотонных пучков с энергией $E_{\phi} = 7-15$ эВ существенно расширяет потенциальные возможности фотохимических и фотофизических технологий и устройств. При помещении предлагаемых источников УФ в лазерную или плазмохимическую среду реализуется режим оптической накачки или поддержания несамостоятельного разряда за счет фотоионизации газовых присадок с потенциалом фотоионизации свыше $U_1 \geq 9,25$ эВ (NO) - 10,15 (NH₃) - 12,1 эВ (O₂,Xe). При генерации фотонов с энергией $E_{\phi} \geq 10-15$ эВ увеличивается коэффициент фотоэмиссии, приближаясь к значению $\gamma \sim 0,1$, что можно использовать при создании эффективных фотокатодов в электронных ускорителях [8]. Предлагаемый открытый импульсно-периодический источник УФ на основе линейки или матрицы излучающих Z-микропинчей плазмы ($N \sim 100$) [9,10] представляет собой тепловой источник и его спектр излучения близок к спектру излучения абсолютно черного тела [11].

2. Источники УФ излучения.

В процессе расчетно-теоретических и экспериментальных исследований [9,10] изучен и установлен механизм генерации фотонов с энергией $E_{\phi} > 10$ эВ, разработаны эффективные источники УФ на основе многоазорного разряда, рис.1-3.



Рис.1. Линейный источник УФ излучения с двойным разрядом на основе матрицы Z-микропинчей. Электроды накоротко подсоединены к емкостному накопителю энергии С. Основной сильноточный разряд малоиндуктивного RCL- контура управляется барьерным разрядом.

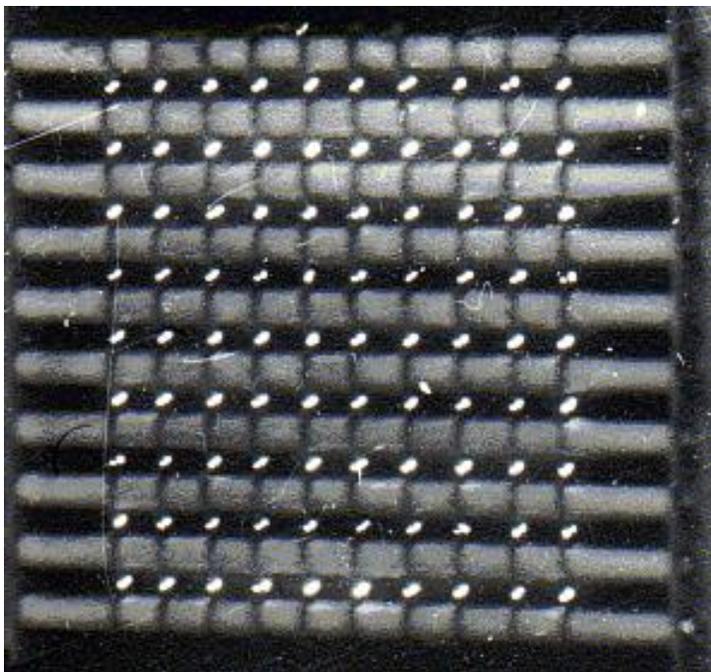


Рис.2. Источник УФ излучения с двойным разрядом на основе матрицы Z-микропинчей.

Источник УФ излучения, рис.2, содержит матрицу разрядных промежутков $N = 90$ на площади $S = 10 \times 10$ см. Схема организации разряда представляет собой двойной разряд, когда возможен режим барьерного разряда и последующее инициирование сильноточного разряда при подключении емкостного накопителя энергии. Параметры плазмы могут изменяться от характеристик барьерного разряда до характеристик сильноточного разряда короткой длительности (Z-микропинч). 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 $t = 0,1 - 1$ мкс и энерговкладе в отдельный разрядный промежуток $W \sim 0,01$ мДж. В зависимости от режима работы потребляемая электрическая мощность составляет $P = 10 - 10^3$ Вт.



Рис. 3. Внешний вид моделей линейного и кольцевого источников УФ. Потребляемая мощность одной линейки или кольца до 100 Вт при напряжении до 3 кВ. Искровые промежутки организованы с зазором 0,2–0,3 мм и шагом 1 см. Импульсно-периодические разряды с частотой $f = 1$ кГц происходят между шайбами из Мо диаметром 3 мм. Искровые промежутки собраны с конденсаторами К15-5 (3.3 нФ, 3 кВ) по схеме Аркадьева-Маркса.

Найдены физико-технические способы быстрого подвода повторяющихся с высокой частотой импульсов тока к матрице микрошнуров плазмы, рассредоточенных на поверхности с плотностью порядка 1 см^{-2} . В моноимпульсе реализован режим квазистационарного состояния микрошнуров плазмы, рис.4, с радиусом $R \sim 0,2$ мм в течение примерно 200 нс, что позволяет обеспечить температуру излучающей плазмы до 1- 5 эВ и выше, рис.4. Найдены способы резкого снижения паразитной индуктивности разрядного RCL – контура и повышения частоты следования импульсов разряда и излучения до $f \geq 10$ кГц. Возможен режим оптимизации температуры плазмы и спектрального состава излучения за счет изменения параметров разрядного промежутка, параметров RCL – контура и состава рабочей смеси газов.



Рис.4. Динамика расширения плазменного микрошнура. Излучающий разряд в воздухе, разрядный промежуток - 0,5 мм, аперийодический импульс тока с амплитудой 750 А имел длительность 400 нс. Экспозиция - 10 нс, интервал между кадрами - 100 нс.[12].

3. Фотоионизационное возбуждение CO₂-лазеров.

Известно [13], что только с помощью слабых пучков быстрых электронов с энергией $E_e > 100$ кэВ можно обеспечить поддержание непрерывных (импульсно-периодических) электроионизационных разрядов в потоке плотных газов. Нами получен квазинепрерывный режим горения разряда в смеси N₂:NH₃ (0,1%), $p \sim 1$ атм, при частоте следования импульсов УФ излучения $f \geq 10$ кГц [1], показана принципиальная возможность квазинепрерывной генерации импульсно-периодического CO₂ – лазера, рис.5,6. По сравнению с электроионизационным разрядом осуществить фотоионизационный разряд технически гораздо проще, однако требуется достаточно точное согласование параметров внешнего источника ионизации (УФ ионизатора) с параметрами газоразрядной камеры, оптимизация химического состава возбуждаемой смеси газов. К очевидным преимуществам фотоионизационной системы накачки по сравнению с электроионизационным способом возбуждения мощных газовых лазеров повышенного давления можно отнести малые весогабаритные параметры, отсутствие высоковакуумной и высоковольтной техники, отсутствие рентгеновского излучения.

Отличие нашего подхода [1] к разработке фотоионизационной системы накачки по сравнению с известными [14], заключалось в том, что в процессе исследований был разработан эффективный источник коротковолнового УФ излучения для спектрального диапазона $\Delta \lambda \approx 100 - 135$ нм, обусловленного спектрами пропускания и фотопоглощения газовых компонент, входящих в состав CO₂ (CO) - лазерных сред. Использование более коротковолнового УФ излучения позволило перейти к молекулярным и атомарным газовым присадкам с низкой температурой кипения (NO, NH₃, C₂H₄, O₂, Xe). Такое направление исследований привело к принципиально новым результатам. Определены оптимальные условия, при которых энергетические затраты на фотоионизацию CO₂(CO) - лазерных сред составили величину порядка 10% от энерговклада в объемный разряд. Переход от паров органических легкоионизируемых соединений [14] к газообразным присадкам снимал технические трудности, связанные с охлаждением лазерных сред, их дозировкой и смешением в проточных системах. Устойчивость квазинепрерывного фотоионизационного разряда оказалась выше, чем в несамостоятельных разрядах, контролируемых пучком быстрых электронов. Этот факт, а также возможность осуществления более однородной ионизации за счет применения встречных пучков фотонов делает данную систему накачки достаточно эффективной и перспективной.

Необходимо отметить, что благодаря применению фотонных пучков (электрически нейтральных) отсутствует обратное воздействие магнитного поля объемного разряда на прохождение ионизирующего излучения. Это позволяет создавать импульсные лазеры с лю-

бым заданным объемом активной среды с повышенным давлением ($p \geq 1$ атм). Известно, что в электроионизационных крупномасштабных лазерах, предназначенных для исследований в области лазерного термояда, не удалось получить заданную энергию излучения из-за воздействия собственного магнитного поля объемного разряда на траекторию быстрых электронов.

Дальнейшее развитие работ, связанных с фотоионизационной системой накачки, может идти по пути оптимизации параметров УФ источника и выбора режимов поддержания электрического поля в объемном разряде. В режиме "дежурного" напряжения на электродах газоразрядной камеры предельное значение параметра $E/p = 5-7$ кВ/см атм в зависимости от рода присадки. Представляет интерес исследование режимов накачки в более широком диапазоне E/P за счет перехода к импульсному питанию объемного разряда. Другая возможность развития работ связана как с повышением интенсивности коротковолнового УФ излучения, так и с увеличением энергии фотонов до уровня $E_{\phi} \sim 20$ эВ. В этом случае возможна ионизация инертных газов (Xe, Kr, Ar) и поиск на этой основе новых лазерных сред, генерирующих в более коротком диапазоне длин волн.

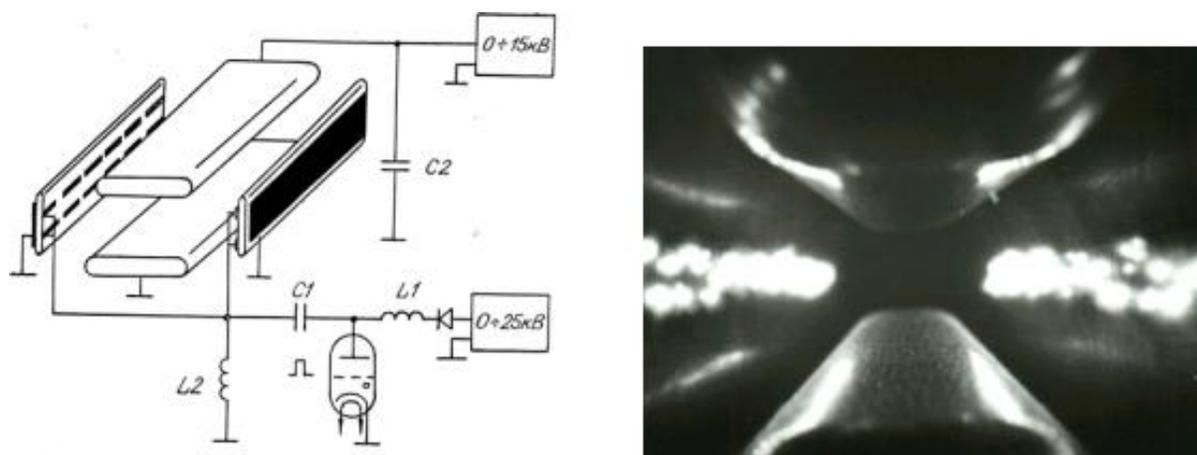


Рис.5. Фотоионизационная система возбуждения лазерных и плазмохимических сред.

При работе со смесью $N_2 : NH_3$ (0,05 %), $p = 0,5 - 1$ атм, достигнут удельный энерговклад:

$W = 0,5 - 0,6$ Дж/см³·атм при $E/p = 5-7$ кВ/см.атм.

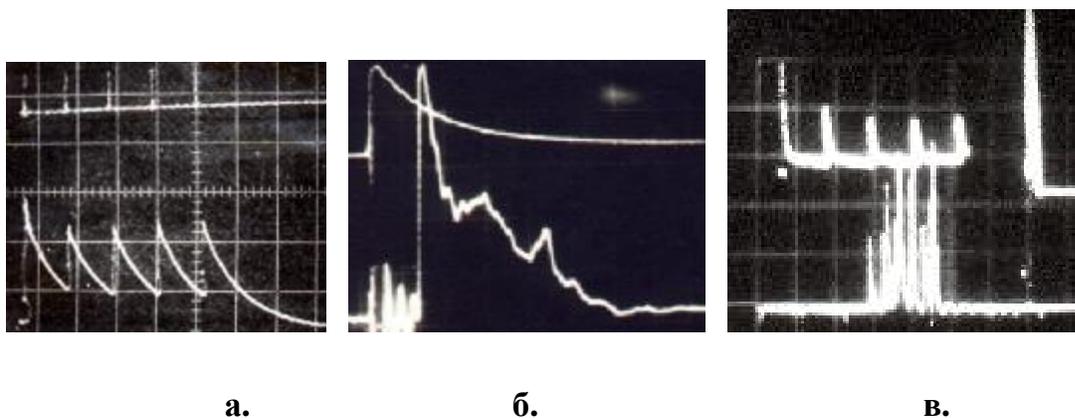


Рис.6. Характерные осциллограммы импульсов ионизации, накачки и генерации (фотоионизационный лазер [1]): а.- импульсы УФ излучения и тока фотоионизационного разряда при $f = 10$ кГц; б. - импульсы разрядного тока и генерации CO_2 - лазера в моноимпульсе; в. - в цуге импульсов, следующих с частотой $f = 10$ кГц (в). Присадка – NH_3 .

4. Экспресс- инактивация микроорганизмов.

Вопросам стерильности в медицине и современных производствах уделяется самое пристальное внимание. Например, стерилизация СБИС перед упаковкой в корпус сохраняет элементы микроэлектроники от окислительных процессов и обеспечивает их длительный ресурс работы в течение десятков лет. Стерилизация с помощью УФ в отличие от стерилизации химикатами действует на все микроорганизмы. Биологический эффект УФ излучения зависит от его спектра, а время инактивации микроорганизмов от интенсивности источника.

В настоящее время в медицине, биологии и микроэлектронике широко применяются источники УФ излучения на основе парортутных ламп низкого давления [15]. Эти бактерицидные лампы имеют высокий коэффициент полезного действия, однако их спектр испускания, сосредоточенный в линии $\lambda = 254$ нм достаточно хорошо согласован лишь со вторым более слабым пиком фотопоглощения ДНК микроорганизмов, рис.7, интенсивность УФ излучения ограничена из-за самопоглощения в парах ртути, наличие ртути делает их экологически опасными устройствами.

Исходя из анализа спектров фотопоглощения ДНК, рис.7, были разработаны плазменные источники УФ с соответствующим спектром испускания, рис. 7. Повышенная бактерицидная эффективность УФ излучения, согласованного с первым пиком поглощения ДНК, была проверена при воздействии на тест-объект (кишечная палочка E-coli) излучения ArF - эксимерного лазера ($\lambda = 193$ нм) [17].

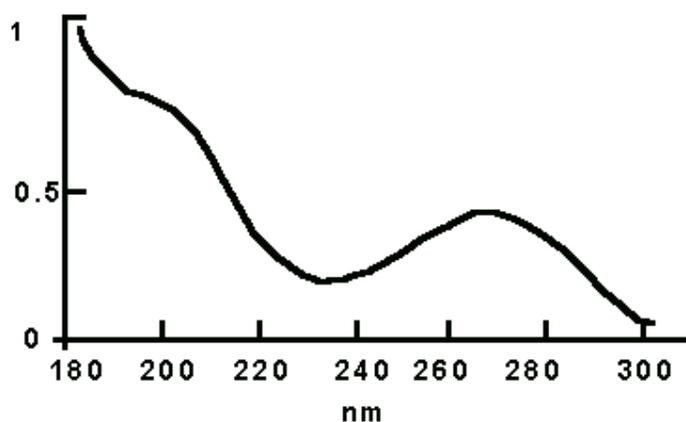


Рис.7. Характерный спектр фотопоглощения ДНК микроорганизмов,[16].

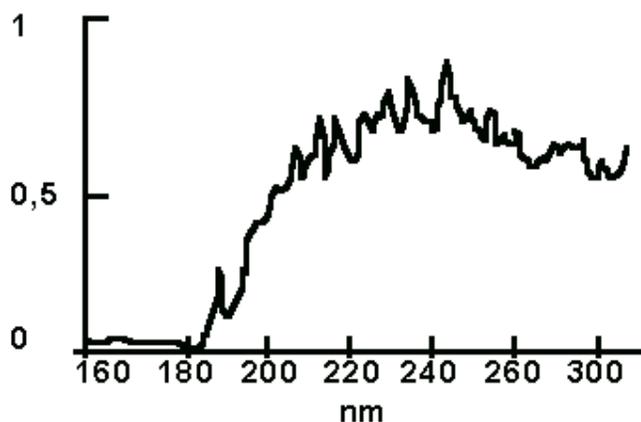


Рис.8. Спектр излучения микрошнуров плазмы при работе линейных источников УФ в атмосфере окружающего воздуха.

Опытный образец экспресс-стерилизатор на базе медицинской коробки типа КФ-3 представлен на рис.9. В качестве плазменного УФ излучателя использовались 8 линейных источников ультрафиолета, расположенных равномерно на внутренней стенке корпуса стерилизатора. Излучение от всех линеек направлено к центру коробки и пронизывает весь рабочий объем стерилизатора. Обрабатываемый инструментарий размещался на специальном держателе, устанавливаемом в рабочем объеме стерилизатора.

При испытаниях в качестве обеззараживаемого объекта использовался музейный штамм кишечной палочки М-17. Испытания проводились с концентрацией 10^7 микробных клеток в 1 мл жидкости при нанесении на поверхность металлического стержня примерно в 0,005 мкл исходного раствора. Обработка обеззараживаемого объекта в предложенном экспресс-стерилизаторе в течение 5 секунд вызвала гибель 99,3 % микробных клеток, 10 секунд -

99,8 %, 30 секунд - 99,99 %, 1 минуты - 100 % микробных клеток по сравнению с контрольным высевом на пластинки с питательной средой, рис. 10.

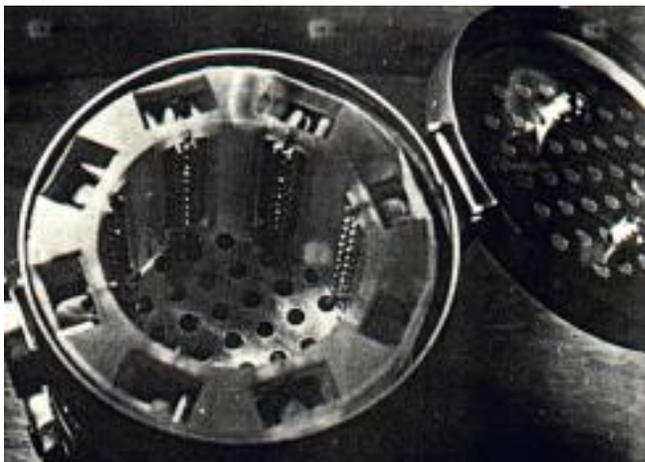


Рис.9. Экспресс-стерилизатор на базе медицинской коробки КФ-3. Длительность вспышки УФ излучения - 1 мкс, частота следования - 1 кГц, потребляемая мощность - 180 Вт.

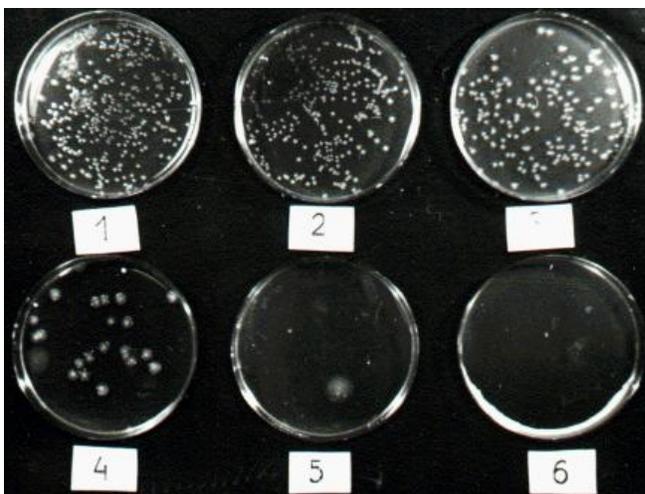


Рис.10. Динамика инактивации микроорганизмов в зависимости от дозы УФ.

$t_1 = 0$ с, $t_2 = 5$ с, $t_3 = 10$ с, $t_4 = 20$ с, $t_5 = 30$ с, $t_6 = 60$ с.

5. Заключение

В процессе исследований использовались лабораторные образцы источников УФ излучения, получены достаточно интересные и перспективные результаты. В тоже время требуется достаточно большая инженерная проработка конструкций, чтобы привлечь внимание заказчиков в промышленности.

Работа поддержана грантом РФФИ № -07-08-00683.

6. Литература

1. Абросимов Г.В., Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Использование импульсно-периодических фотоионизационных разрядов для возбуждения квазинепрерывных газовых лазеров. Квантовая электроника. т. 12, № 11, с. 2256-2263 (1985).
2. Ахманов А.С., Саенко В.Б., Ястребов А.А. и др. Лазерный комплекс для специализации интегральных схем // Электронная промышленность. № 4, с. 42 (1992).
3. Торховский В.Н., Лихтерева Н.М., Саенко В.Б. К вопросу об использовании УФ/озон технологии. Наука и технология углеводородов. № 4, с. 38-47 (2000).
4. Дамбраускас С.Г., Рахимов А.Т., Саенко В.Б. Широкоапертурный источник ультрафиолета для терапии и экспресс-стерилизации медико-биологических объектов. Медицинская физика. № 11, часть VIII., с. 55-56 (2001).
5. С.Г. Дамбраускас, А.Т. Рахимов, В.Б. Саенко, А.М. Юдин, Б.П. Яценко. Физические особенности использования источников УФ излучения и озона в системах водоподготовки. В кн.: Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сборник научных трудов/ Под ред. В.И.Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, № 13, с. 167 – 175 (2005).
6. Е.Н. Савинов. Фотокаталитические методы очистки воды и воздуха. Соросовский образовательный журнал, том 6, стр.52-56 (2006).
7. Иванов В.В., Попов Н.А., Саенко В.Б. и др. Исследование процессов образования и гибели озона при фотолизе кислорода в камере ВУФ-озонатора. Письма в ЖТФ, т. 27, вып. 1, с. 65-71 (2001).
8. Глотов Е.П., Дегтярев А.Г., Розанов В.Б., Свириденко Ю.П. Электронная пушка с фотокатодом для электроионизационных лазеров. Квантовая электроника. т. 3, № 10, с. 2181-2186 (1976).
9. Иванов В.В., Рулев Г.Б., Саенко В.Б. Применение излучающих микрошнуров плазмы для создания открытых широкоапертурных источников УФ. Письма в ЖТФ, т. 21, вып. 7, с. 65-68 (1995).
10. В.Б. Саенко. Импульсно-периодический широкоапертурный источник ультрафиолетового излучения на основе матрицы микрошнуров плазмы. Патент РФ на изобретение № 2326463 от 10.06.2008.
11. А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе. Физика сильноточных электроразрядных источников света. Москва. Атомиздат, 1976.
12. Абросимов Г.С., Польский М.М., Саенко В.Б. Использование лазерной среды для фотографирования поверхности, закрытой слоем плазмы. Квантовая электроника, т. 15, № 3, с. 640-641(1988).

13. Велихов Е.П., Письменный В.Д., Рахимов А.Т. Независимый газовый разряд, возбуждающий непрерывные СО₂-лазеры. УФН, т. 122, вып. 3, с. 419-502 (1972).
14. Галактионов И.И., Горелов В.Ю., Подмошенский И.В. Электрические и генерационные характеристики фотоионизационного СО₂-лазера. Квантовая электроника, т. 3, № 12, с. 2570-2575 (1978).
15. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. Москва, «Мир», т.2, 1985.
16. Бенсассон Р. и др. Флеш-фотолиз и импульсный радиолиз. Москва, «Мир», 1987.
17. В.Ю.Гусев, А.Т.Рахимов, Г.Б.Рулев, В.Б.Саенко, А.А.Ястребов. Бактерицидные установки для медицины на основе плазменных источников ультрафиолетового излучения и озона. Конверсия, № 6, с.41-43 (1993).