

А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

**ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОИОНИЗАЦИИ
ЛАЗЕРНЫХ СРЕД.**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 –16/755

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

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

А.Т. Рахимов, В.Б. Саенко

**ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОИОНИЗАЦИИ
ЛАЗЕРНЫХ СРЕД.**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 –16/755

УДК 621.3.032.35

ББК 22.345

E-mail: V.Saenko@mics.msu.su

Preprint of Institute of Nuclear Physics № 2004-16/755

A.T. Rakhimov, V. B. Saenko

THE UV SOURCE FOR PHOTOIONIZATION LASER MEDIA

Abstract

The open-type pulse repetitions UV ionisers have been developed on a basis of various schemes of high-current discharge that intensively emit in spectral range of $\lambda \leq 130$ nm, when operating in lasing media containing such buffer gases as N₂, Ar, He. The UV ionizer on a discharging of combined discharge, where the barrier discharge is used to pre-ionize on array of discharge gaps and repetition commutating of the short pulse high current discharge, allows to achieve the value of parameter $dI/dt \geq 10^{10}$ A/s at aperiodic shape of discharge current pulse and voltage below electric breakdown value. Possibility was demonstrated of photoionizing of lasing media containing low boiling components (NO, NH₃, C₂H₄, O₂, F₃I, Xe). For an atmospheric pressure CO₂ with admixed NH₃ the possibility was shown of obtaining of quasi continuous generation of laser radiation at pulse repetitions rate of the photoionization pulses $F \geq 10$ kHz.

This work has been carried out under support of RFBR (grants № 02-02-08069).

A.T. Рахимов, В. Б. Саенко

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОИОНИЗАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД.

Аннотация

Разработаны открытые импульсно-периодические УФ ионизаторы на основе различных схем сильноточного разряда короткой длительности, интенсивно излучающие в спектральной области $\lambda \leq 130$ нм при работе в лазерных средах с такими буферными газами, как N₂, Ar, He. УФ ионизатор на основе комбинированного разряда, когда барьерный разряд используется для предыонизации матрицы разрядных промежутков и импульсно-периодической коммутации сильноточного разряда короткой длительности, способен обеспечить значение параметра $dI/dt \geq 10^{10}$ А/с при аperiodической форме разрядного тока и напряжении ниже пробойного значения. Показана возможность фотоионизации лазерных сред, имеющих газовые присадки с низкой температурой кипения (NO, NH₃, C₂H₄, O₂, CF₃I, Xe). На примере фотоионизационного возбуждения CO₂ – лазерных сред атмосферного давления с присадкой NH₃ показана возможность получения квазинепрерывной генерации лазерного излучения при частоте следования импульсов фотоионизации $F \geq 10$ кГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-02-08069-инно).

© Рахимов А.Т., Саенко В.Б., 2003

© НИИЯФ МГУ, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	5
2. Экспериментальная установка и методы измерений.....	6
3. УФ ионизаторы для фотоионизационных лазеров.....	8
4. Фотоионизационное возбуждение лазерных сред.....	15
5. Заключение	18
6. Литература.....	19

1. Введение.

Разработка линейных и широкоапертурных источников коротковолнового ультрафиолетового излучения необходима для проведения исследований в области лазерной физики, а также для создания мощных технологических лазеров на самостоятельном разряде [1-5].

На первом этапе исследований было показано, что при соответствующей оптимизации эффективным источником УФ может служить многоазорный скользящий по поверхности диэлектрика разряд [3,4]. Однако, традиционное использование низкоиндуктивной RCL-разрядной схемы с последовательно включенным коммутатором ограничивало скорость ввода энергии в излучающие плазменные шнуры, а также частоту следования импульсов фотоионизации. При увеличении масштабов излучающей поверхности источник УФ требовал слишком больших напряжений для пробоя искровых промежутков. Кроме того, при использовании скользящего разряда менялся химический состав рабочей смеси газов за счет эрозии подложки, ресурс источника УФ также сильно зависел от термостойкости подложки.

Эти недостатки исключены или значительно уменьшены благодаря специально разработанной конструкции источников УФ (УФ ионизаторов), в которых электроды приподняты над подложкой (режим свободной искры) и позволяют использовать принцип иницирования сильноточного разряда от внешнего маломощного источника высокого напряжения с частотой следования выше 10 кГц.

В результате экспериментальных исследований показана принципиальная возможность создания линейных (порядка 1 м) или широкоапертурных (порядка 1 м²) источников УФ с плотностью расположения излучающих микрошнуров плазмы порядка 1 см⁻². Разработаны открытые импульсно-периодические УФ ионизаторы на основе различных схем сильноточного разряда короткой длительности, интенсивно излучающие в спектральной области $\lambda \leq 130$ нм при работе в лазерных средах с такими буферными газами, как N₂, Ar, He. УФ ионизатор на основе комбинированного разряда, когда барьерный разряд используется для предыонизации матрицы разрядных промежутков и импульсно-периодической коммутации сильноточного разряда короткой длительности, способен обеспечить значение параметра $di/dt \geq 10^{10}$ А/с при аперодической форме разрядного тока и напряжении ниже пробойного значения. Показана возможность фотоионизации лазерных сред, имеющих газовые присадки с низкой температурой кипения (NO, NH₃, C₂H₄, O₂, CF₃I, Xe). На примере фотоионизационного возбуждения CO₂ – лазерных сред атмосферного давления с присадкой NH₃ показана возможность получения квазинепрерывной генерации лазерного излучения при частоте следования импульсов фотоионизации $F \geq 10$ кГц.

2. Экспериментальная установка и методы измерений.

Модели фотоионизационных CO₂-лазеров представлены на рис. 1, 2. В камере из оргстекла с объемом 10 л устанавливались плоскопараллельные электроды с профилем Брюса, рис.1. Плоская часть электродов имела размеры $b \cdot h = 2 \times 50$ см, межэлектродный зазор изменялся в пределах $h = 2-5$ см. Объемный разряд иницировался УФ-излучением многоазорного разряда. Для

создания искровых промежутков использовался, в основном, фольгированный медью стеклотекстолит толщиной 2 мм. На такой пластине формировалась цепочка электродов длиной 50 см, которая устанавливалась вдоль оси системы на расстоянии 2 см от края электродов. Цепочка электродов обратным проводом подключалась к емкости $C_1 = 2,5-100$ нФ, заряжаемой до напряжения $U_1 = 10-20$ кВ через тиратрон ТГИ 1-1000/25, что позволило осуществить периодический режим ионизации с частотой до 20 кГц. Наряду со скользящим разрядом исследовался режим свободной искры, когда разрядные промежутки были приподняты над поверхностью диэлектрической подложки.

На первом этапе исследований нами была проведена оптимизация параметров скользящего разряда с целью получения достаточно интенсивного потока фотонов с энергией $E_{\text{ф}} = 10-15$ эВ. Перераспределение энергии излучения разряда по спектральному диапазону осуществлялось за счет вариации параметров питающего LCR-контура и выбора геометрии разряда. Выход жесткого УФ повышался при уменьшении межэлектродных зазоров до величины ≤ 1 мм и увеличении числа излучающих ячеек до 50-100 штук, расположенных на длине 50 см.

Основные электроды подключались к емкости $C_2 = 4$ мкФ, $U_2 = 0 - 15$ кВ, работающей в режиме частичного разряда. За время импульса объемного разряда спад напряжения на емкости C_2 не превышал 10 %. После предварительной откачки ($P = 10^{-2}$ Торр) камера заполнялась необходимыми смесями газов с регулируемым соотношением компонент. Давление рабочей смеси менялось в диапазоне $P = 0,1-1$ атм.

Варируя плотность присадки n_x с сечением фотоионизации $\sigma_{\text{и}}$, можно добиться довольно значительной глубины проникновения фотонов, обеспечивающих однородную фотоионизацию в газовой среде повышенного давления. При двусторонней подсветке и типичных размерах лазера $h \cdot b \cdot l = 10 \times 10 \times 100$ см можно принять длину пробега фотонов $l_{\text{ф}} = 5$ см, тогда $n_x = 1/l_x = 10^{16}-10^{17}$ см⁻³, т.к. сечение фотоионизации большинства молекулярных и атомарных газов $\sigma_{\text{и}} = 10^{17}-10^{18}$ см². Это примерно 0,1-1 % от состава рабочей смеси газов. Как правило, УФ ионизатор, в спектре излучения которого должен содержаться достаточно интенсивный поток фотонов с энергией $E_{\text{ф}} > 9,25$ эВ, погружен в рабочую смесь газов. В большинстве лазерных сред используются такие буферные газы, как N_2 , Ar, He, концентрация которых составляет 50-90% от состава рабочей смеси газов. Буферный газ существенно влиял на спектральный состав излучения, а также определял границы коротковолнового излучения, так N_2 заметно поглощает УФ с длиной волны $\lambda < 100$ нм ($E_{\text{ф}} > 12,5$ эВ), Ar с $\lambda < 70$ нм ($E_{\text{ф}} > 15,7$ эВ), He прозрачен вплоть до $\lambda = 50,4$ нм ($E_{\text{ф}} = 24,6$ эВ).

Исследовалось горение ФИР в лазерных средах на основе CO_2 , CO, Xe, O_2-I_2 . В качестве присадок изучались молекулярные (NO , NH_3 , C_2H_4 , O_2 , I_2 , CF_3I) и атомарные (Ar и Kr) газы, буферными газами являлись N_2 или Ar с добавлением He. При использовании выбранных присадок наблюдалось нестационарное горение ФИР. За время импульса фотоионизации пиковая концентрация электронов в объемном разряде в зависимости от энерговклада в УФ ионизатор и рода присадки составляла величину $N_e = 10^{12}-10^{14}$ см⁻³, после чего плазма распадалась при $E/p = 6-8$ кВ/см·атм в течение 2-100 мкс в зависимости от химического состава лазерной среды. При снижении энерговклада за импульс в УФ ионизатор до уровня 0,01 Дж/см² осуществлен импульсно-периодический режим фотоионизации с частотой до $F = 20$ кГц.

Осциллографировались импульсы тока и напряжения, а также интенсивность УФ излучения в различных участках спектра. Проводилось фотографирование излучающего и объемного разрядов.

В режиме измерения коэффициента усиления CO_2 -лазерных сред торцы камеры закрывались фланцами с окошками из NaCl . В режиме генерации для вывода излучения использовался устойчивый резонатор, образованный сферическим глухим зеркалом с радиусом кривизны 5 м и плоским зеркалом с центральным отверстием 3 мм, закрытым окошком из NaCl . Для относительных измерений энергии излучения CO_2 -лазера использовался прибор ИМО-2.

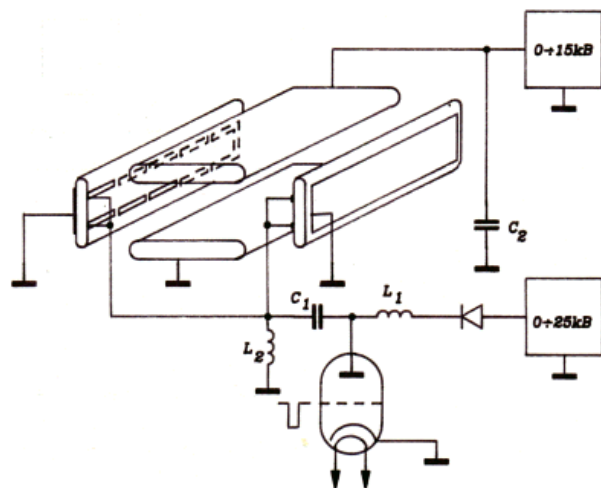


Рис. 1. Электрическая схема фотоионизационной системы накачки. Свечение источников УФ и фотоионизационного разряда при использовании боковой подсветки электродов.

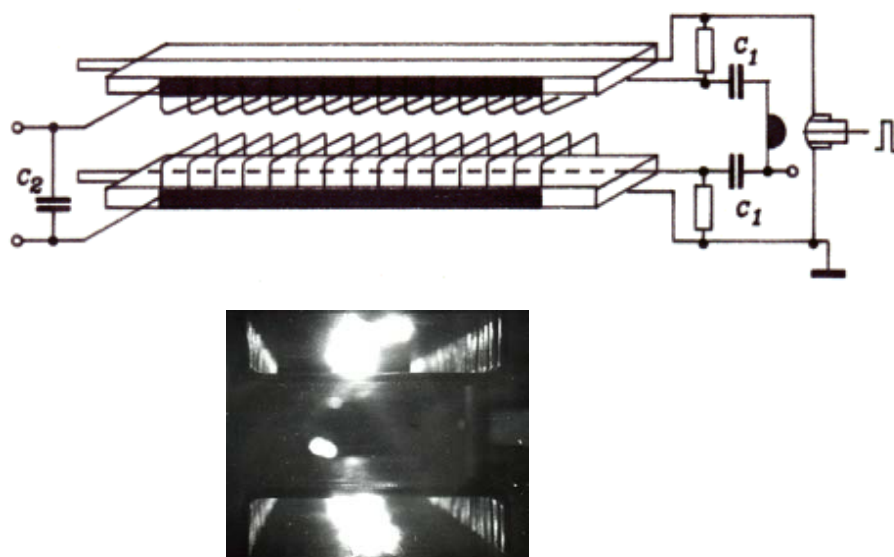


Рис.2. Электрическая схема фотоионизационной системы накачки, моделирующей проточную схему лазера с поперечным разрядом. Свечение источников УФ и фотоионизационного разряда при использовании поперечной схемы подсветки через прозрачные (решетчатые) электроды.

3. УФ ионизаторы для фотоионизационных лазеров .

Скольльзящий разряд. УФ-ионизатор на основе скользящего разряда, представлял собой RCL-разрядный контур с последовательно включенным коммутатором. В процессе экспериментов параметры такого ионизатора оптимизировались, исследовались особенности излучающей плазмы, были определены предельные параметры при импульсно-периодическом режиме работы. На рис. 1 представлена одна из типичных схем УФ-ионизатора. На поверхности фольгированного медью стеклотекстолита образованы 10 дорожек, имеющих по 50 зазоров (n). При разряде образуется ряд микрошнуров плазмы длиной $l \leq 1$ мм и радиусом $r \approx 0,1 \div 0,3$ мм при энерговкладе $W_1 = 0,01 \div 1$ Дж.

Для прямой фотоионизации таких молекулярных и атомарных газов как NO, NH₃, C₂H₄, O₂, Xe и т.д. необходимо генерировать интенсивный поток фотонов с энергией $E_{\text{ф}} \approx 9,25 \div 12,5$ эВ. Энергетическая эффективность излучающего разряда для этого спектрального интервала должна быть такой, чтобы энергозатраты на фотоионизацию W_1 оставались малыми по сравнению с энерговкладом в объемный разряд W_2 , т.е. $W_1 = \delta \cdot W_2$ при $\delta < 1$. В смесях N₂ : X, здесь X - присадка NO, NH₃, Xe величина $\delta \approx 0,1$ при энерговкладе в искру $W \sim 0.1$ Дж ($n = 100$) и объеме газоразрядной камеры $V \cdot p = 300$ см³·атм. Эти результаты получены при следующих параметрах RCL-контра:

$$C_0 = 2 \cdot 0,2 \text{ мкФ}; \quad U_0 = 8 \text{ кВ.}$$

В контуре использовался управляемый разрядник с межэлектродным расстоянием $l_1 = 0,5$ см. В многозазорной системе скользящего разряда межэлектродный промежуток равнялся $l_2 = n \cdot \Delta l \approx 5 \div 10$ см. Среднее значение сопротивления искры [6] $R = k \cdot p \cdot l / 0,5 \cdot C \cdot U$, где $k \approx 8 \cdot 10^{-4}$ - коэффициент, зависящий от газа, l - приведенная длина искры [см]; $q = C \cdot U$ - заряд, p - давление газа. Таким образом, сопротивление контура $R = R_p + R_{пл} \approx 2 \div 3$ Ом. За счет снижения паразитной индуктивности обычно формировался аperiodический импульс тока длительностью $t \leq 1$ мкс, $L \sim 10^{-7}$ Гн. При появлении колебаний тока и превышении длительности разряда эффективность УФ-ионизатора резко ухудшалась.

Из работ [3-5], посвященных газоразрядным импульсным источникам света и анализу RCL - контуров, известно следующее. Ток, протекающий через колебательный контур в момент t можно выразить в виде

$$(1) \quad I(t) = \frac{U}{L} e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \frac{1}{\omega} \sin \omega t$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \omega_0 \sqrt{1 - \gamma^2}, \quad \text{где } \gamma = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Аperiodический разряд реализуется при $\gamma=1$, когда сопротивление контура

$$R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad \text{Проблема снижения паразитной индуктивности ограничивает}$$

рабочее напряжение высоковольтных конденсаторов в пределах 20 - 25 кВ. Кроме того, между длительностью вспышки и величиной рассеиваемой электрической энергии существует эмпирическое соотношение [7]. Для получения коротких импульсов света $t \leq 1$ мкс емкостной накопитель энергии должен иметь энергозапас не более 10 Дж [7]. Отметим, что длительность жесткого УФ-излучения определяется временем охлаждения плазмы за счет разлета и не превышает величины $t \sim 1$ мкс при энерговкладе в шнур плазмы $W \leq 1$ Дж. Таким образом, при использовании RCL - контура существуют ограничения на $U \leq 20 \div 25$ кВ и $W_1 \leq 10$ Дж при $L \leq 10^{-7}$ Гн. Для реализации аperiodического режима необходимо, чтобы сопротивление излучающей

$$\text{плазмы } R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \geq 2 \sqrt{\frac{L U^2}{2 W_1}} \geq 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot U \geq 1 \text{ Ом. При использовании}$$

многозазорной структуры, т.е. последовательном соединении микрошнуров плазмы, это условие удастся выполнить. При количестве зазоров $n = 50 \div 100$ и энергозапасе $W_1 \leq 10$ Дж скользящий разряд является эффективным линейным источником жесткого УФ-излучения. При использовании коротких промежутков

величина пробойного напряжения $U_{\text{проб.}} \geq 5$ кВ. При работе с последовательными разрядниками [9], которые по электротехническим характеристикам аналогичны исследуемым источникам УФ-излучения, отмечалось, что время пробоя практически не зависит от числа зазоров и составляет $t \sim 1$ нс, время деионизации плазмы мало, что способствует импульсно-периодическому режиму работы с повышенной частотой следования импульсов света. Нами достигнута частота следования $f = 10 - 20$ кГц при энерговкладе в искру $W_1 = 0,01$ Дж.

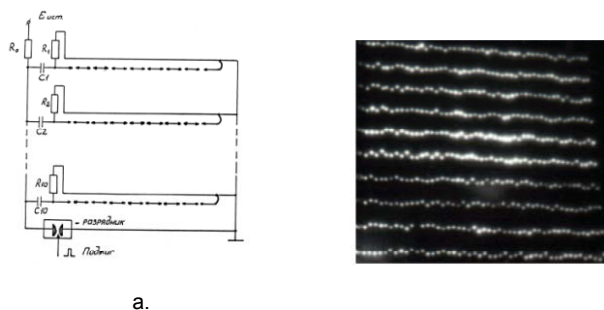


Рис.3. УФ ионизатор на основе скользящего разряда: а.- электрическая схема, б.- опытный образец УФ ионизатора: 10 дорожек многозазорного излучающего разряда, образующих матрицу микрошнуров плазмы на площади 50 x 50 см в схеме со скользящим по поверхности диэлектрика разрядом.

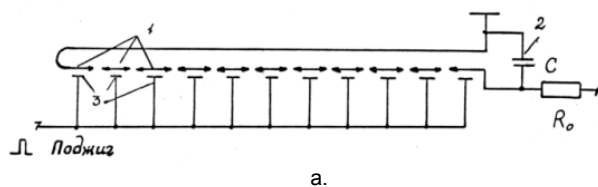


Рис.4. УФ ионизатор на основе двойного разряда: а.- электрическая схема, б.- опытный образец УФ ионизатора - линейка микрошнуров плазмы в схеме с двойным разрядом.

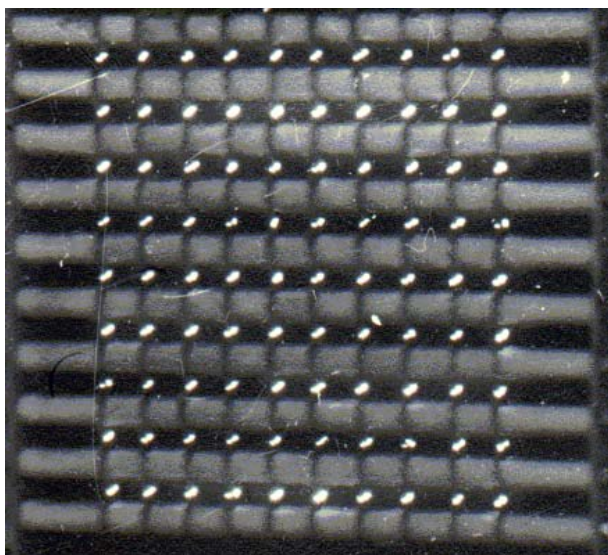


Рис.5. Широкоапертурный источник УФ на основе матрицы излучающих микрошнуров плазмы, собранных на площади 100 x 100 мм. Длительность вспышки УФ $t = 1$ мкс, частота следования $F = 1 - 10^4$ Гц при энерговкладе $W = 10$ мДж – 1Дж в отдельный зазор ($d = 0,5$ мм).

Исследования показали, что УФ ионизатор обеспечивал достаточно интенсивную вспышку УФ при аperiodической форме разряда с длительностью импульса тока $t \leq 1$ мкс и скорости нарастания тока $di/dt \geq 10^9$ А/с. При рассогласовании RCL-контура и появлении колебаний тока эффективность источника УФ резко ухудшалась. Коротковолновый ультрафиолет отсутствовал в случае, когда длительность разрядного тока превышала $t \geq 1$ мкс, рис.4.

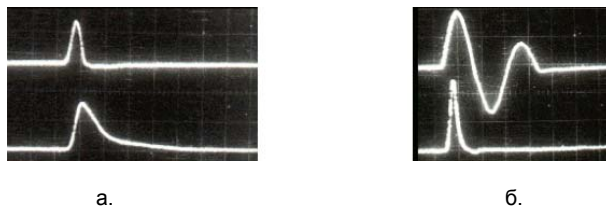


Рис.6. Осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и интенсивности УФ (нижний луч, ФЭУ-142, $\Delta\lambda = 112-365$ нм). Развертка – 0,5 мкс/дел. Амплитуда разрядного тока – 0,75 кА (а) и 4 кА (б).

Оценки показали, что первоначально плазма внутри канала может быть равновесно нагрета до температуры $T > 2$ эВ. В дальнейшем плазма остывала

за счет разлета. Характерное время разлета, которое должно соответствовать длительности излучения жесткого УФ, можно определить как $t = r/v = 10^{-6}$ с, здесь v - скорость звука в нагретом газе, r - радиус шнура. Привлечение такого механизма генерации 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, рис. 6-б. Отсюда следует, что необходимо использовать аperiodическую форму разряда с крутым фронтом тока, чтобы обеспечить максимальный энергоклад за время ее разлета, рис. 6-а. Интенсивные вспышки УФ получены за счет применения коротких разрядных промежутков $d \leq 1$ мм, количество которых определяло общее сопротивление плазмы и было согласовано с волновым сопротивлением низкоиндуктивного RCL-контура. При стремлении к эффективному режиму энергоклада в излучающую плазму удалось получить аperiodические импульсы тока с амплитудой $I \sim 1$ кА с длительностью фронта тока $t = \sqrt{LC} \leq 100$ нс, которые обеспечили самосжимающийся разряд типа Z-пинча с эффективным нагревом квазиравновесных микрошнуров плазмы.

При формировании двойного импульса питания с регулируемой скважностью показано, что при снижении энергоклада в отдельную искру до значения $W \leq 10^{-2}$ Дж возможен режим повторения с частотой до $F \sim 100$ кГц. Действительно, двойной импульс тока с интервалом $\Delta t = 10$ мкс при энергокладе в отдельную излучающую ячейку $W = 0,1$ Дж приводил к двойному импульсу тока объемного разряда с одинаковой амплитудой.



а.

б.

Рис. 7. а. – Двойной импульс фотоионизации вызвал нарастающее протекание тока объемного разряда.

б. - Квазинепрерывный разряд в смеси $N_2:NH_3(0,1 \%)$ со средней мощностью энергоклада $750 \text{ Вт/см}^3 \cdot \text{атм.}$ $(E/p)_0 = 6 \text{ кв/см-атм}$, $(E/p)_{\text{кон}} = 2,5 \text{ кв/см-атм}$, УФ излучение длительностью 1 мкс следовало с частотой $F=10$ кГц. Развертка – 100 мкс/дел. Энергоклад в излучающие микрошнуры плазмы – 10 мДж/искру. Импульсы УФ (верхний луч), ток фотоионизационного разряда – 18 А/дел (нижний луч).

В наших экспериментах импульсы УФ излучения оставались стабильными при частоте $f = 10-20$ кГц ($C_1 = 2,5-10$ нФ и $U_1 = 15-20$ кВ), которая ограничивалась предельными частотными характеристиками применяемого тиратрона. На рис. 7 а, б представлены осциллограммы сигналов тока скользящего разряда I_1 и тока объемного разряда I_2 в квазинепрерывном режиме горения.

В экспериментах со скользящим разрядом при использовании в качестве коммутаторов высоковольтных разрядников или тиратронов типа ТГИ-1000/25 скорость нарастания тока не превышала величины $dI/dt \approx 10^9$ А/с при типичных

значениях $U_0 \approx 20$ кВ, $L \approx 10^{-6}$ Гн. Были предложены и разработаны схемы организации излучающего разряда, которые позволили резко снизить паразитную индуктивность: а) за счет применения модифицированной схемы Аркадьева-Маркса, б) за счет использования схемы двойного разряда, когда вся матрица разрядных промежутков предварительно ионизируется.

Комбинированный (двойной) разряд. Применение RCL-разрядной схемы с последовательно включенным коммутатором обладает рядом недостатков. На коммутаторе рассеивается до 20% запасенной энергии. При увеличении масштабов ионизатора его частотные характеристики в импульсно-периодическом режиме ограничены предельными параметрами коммутирующей аппаратуры. Кроме того, паразитная индуктивность коммутатора может затруднить реализацию аperiodического режима разряда. На рис. 4,5 представлена схема и опытные образцы УФ-ионизаторов с внешним поджигом. Такая схема позволяет осуществить плотную компоновку емкости C_0 с разрядным промежутком и снизить паразитную индуктивность контура. Дежурное напряжение на емкости C_0 можно изменить в достаточно широком диапазоне, изменяя ширину зазора первой ячейки. Для поджига достаточно энергии $\sim 0,1$ Дж, что составляет примерно 1% от энергии, вкладываемой в излучающий разряд. Низкоэнергетическая схема поджига снимает ограничения по частоте следования импульсов разряда. В данной схеме частота будет ограничена процессами деионизации в микрозазорах излучающего разряда. Хотя ресурс источников УФ на основе скользящего разряда, использующих фольгированный стеклотекстолит, достаточно велик и выдерживает до $10^6 \div 10^7$ вспышек при энергокладе в искру $W_1 \sim 0,1$ Дж нами рассмотрена возможность создания последовательной структуры искр, образованных не на поверхности, а в газе. Схема такого УФ-ионизатора с внешним поджигом представлена на рис. 4-а. Цепочка электродов I коротко подключена к емкости 2, обеспечивающей на многозачном разрядном промежутке дежурное электрическое поле. Дополнительные электроды 3 соединены в параллельную электрическую цепь и подключены к импульсно-периодическому источнику высоковольтных коротких импульсов. Второй низкоэнергетический разрядный контур, гальванически развязанный от основного контура, предназначен для пробоя последовательности из n-разрядных промежутков. Для создания проводимости в микрозазорах достаточен энергоклад в отдельную ячейку $W_n \sim 10^{-7}$ Дж [6], что позволяет снизить напряжение пробоя разрядного контура почти на порядок. УФ-ионизатор на основе двойного разряда обеспечивает следующие преимущества.

- Параметры основного RCL-разрядного контура за счет разделения функций пробоя и формирования импульса тока могут регулироваться в гораздо более широком диапазоне, благодаря чему достаточно просто обеспечить аperiodическую форму разряда при высокой скорости ввода энергии в разлетающуюся плазму. В результате увеличивается доля жестких квантов в спектре излучения плазмы и повышается эффективность фотоионизации молекулярных и атомарных газов. В такой схеме паразитная индуктивность определяется в основном индуктивностью конденсаторов. При условии $U \ll U_{пр}$ емкость C может быть значительно увеличена. Такая батарея конденсаторов также имеет меньшую величину L. При аperiodической форме разряда можно обеспечить фронт тока на уровне:

$$\frac{I_m}{t_m} = \frac{U_0}{eL} \approx 10^{11} \div 10^{12} \text{ A/c}$$

- Применение низкоэнергетической системы поджига дает возможность коммутировать излучающий разряд с более высокой частотой, используя, например, таситроны с частотой прерывания $f \sim 100$ кГц.

- Снижение напряжения на УФ-ионизаторе позволяет приблизить излучающую поверхность к электродам газоразрядной камеры и существенно сократить потери ионизирующего излучения. Кроме того, можно увеличить плотность расположения микрошнуров плазмы на подложке протяженных размеров.

- Схема УФ-ионизатора с внешним конденсаторным поджигом позволяет организовать как скользящий, так и свободный искровой разряд в газе. С точки зрения стабильности, термостойкости и ресурса последняя форма организации излучающего разряда может быть предпочтительнее.

На основе экспериментальных результатов были усовершенствованы и созданы опытные образцы источников УФ, рис.4,5 с длительным ресурсом работы, что важно для промышленного использования. Наиболее уязвимым элементом оказались электроды, которые в процессе работы сильно окислялись под воздействием озона при работе в кислородосодержащих газовых средах. Отметим, что при работе источника УФ наблюдался интенсивный фотосинтез озона. Использование вольфрамовых и молибденовых электродов, не подвергшихся процессам окисления, позволило обеспечить стабильный и длительный режим работы источника УФ.

4. Фотоионизационное возбуждение лазерных сред.

Лазерные установки, рис.1,2 были использованы для проверки возможностей фотоионизационной системы накачки лазерных сред. В таблице 1 приведены электрические и энергетические характеристики фотоионизационной системы накачки при использовании газовой смеси $N_2 : X$ при давлении $p = 0,5$ атм. X – присадка для прямой фотоионизации. $(E/p)_0 = 7,5$ кВ/см.атм – начальное значение приведенного электрического поля в разряде.

Таблица 1.

$N_2 : X$; $p = 0,5$ атм; $(E/p)_0 = 7,5$ кВ/см.атм;
 $U_1 = 8$ кВ; $W_1/n = 0,38$ Дж/искру; $t_p^* = W_2/U_{cp}$. I_{max}

X, присадка	U_1 , эВ	N_{x1} , %	$(E/p)_{cp}$, кВ/см.атм	I_2 max, кА	W_2 , Дж	$\delta = W_1/W_2$	t_p^* , мкс
NO	9,25	0,3	6,35	11,2	58,4	0,66	1,0
C ₂ H ₄	10,5	0,1	6,0	4,43	70,8	0,54	2,7
NH ₃	10,15	0,075	5,65	2,4	88	0,43	6,5
Xe	12,1	0,025	6,2	0,84	68	0,56	13,1
O ₂	12,1	1,0	6,65	0,69	45	0,85	10,0
I ₂	9,28	0,01	6,85	1,8	36	1,08	3,0
CF ₃ I	-	0,01	7,0	1,0	15	2,67	2,2

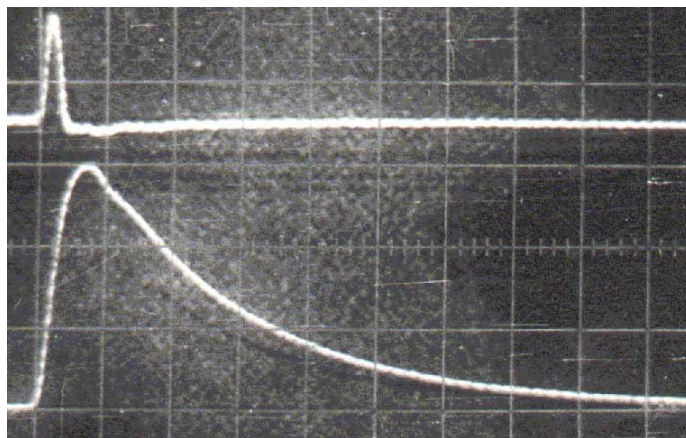


Рис.9. Осциллограммы тока излучающего (верхний луч) и объемного (нижний луч) разряда. Смесь $N_2: NH_3$, $p=0,5$ атм. Развертка 20 мкс/дел.

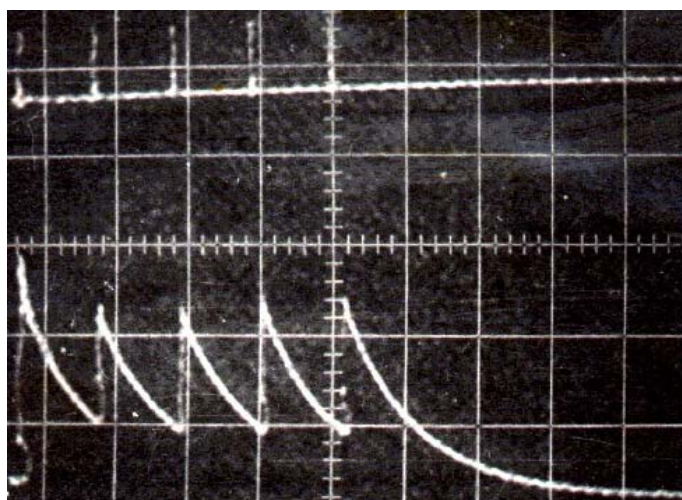


Рис.10. Осциллограммы тока излучающего (верхний луч) и объемного (нижний луч) разряда. Смесь $N_2: NH_3$, $p=0,5$ атм. Развертка 100 мкс/дел. (Частота следования импульсов фотоионизации – 10 кГц). Квазинепрерывный режим накачки с мощностью энергоклада $750 \text{ Вт/см}^3 \cdot \text{атм}$ при значении приведенного электрического поля $E/P=5 \text{ кВ/см} \cdot \text{атм}$.

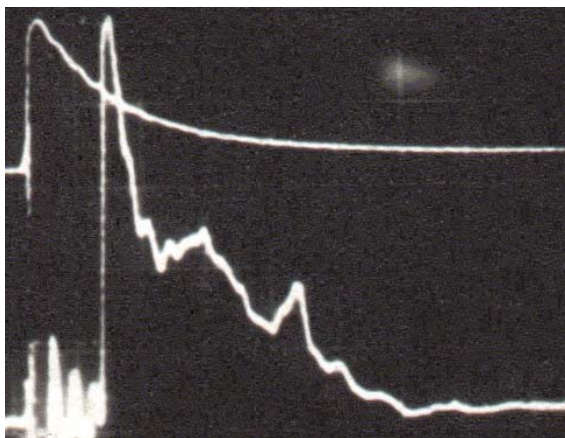


Рис.11. Осциллограммы тока объемного разряда (верхний луч) и генерации CO_2 -лазера (нижний луч) . Смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{NH}_3$, $p=0,5$ атм. Развертка 50 мкс/дел. Виден срыв объемного разряда в дуговой режим после импульса генерации.

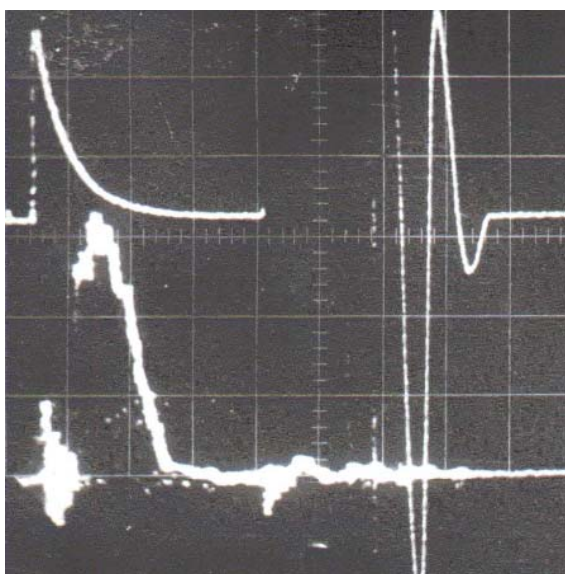


Рис.12. Осциллограммы тока объемного разряда (верхний луч) и генерации CO_2 -лазера (нижний луч) . Смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{NH}_3$, $p=0,5$ атм. Развертка 50 мкс/дел. Виден срыв объемного разряда в дуговой режим после импульса генерации.

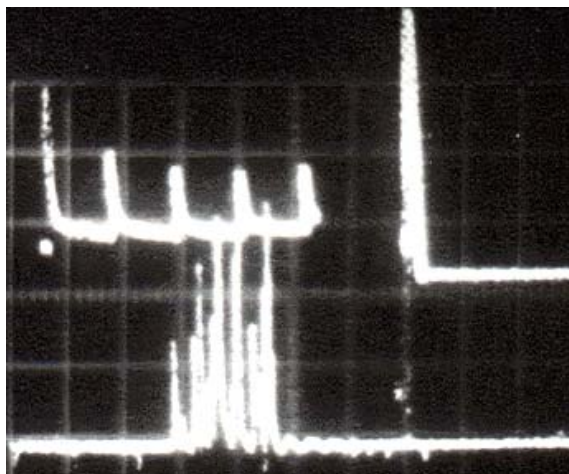


Рис.13. Осциллограммы тока объемного разряда (верхний луч) и генерации CO_2 -лазера (нижний луч). Смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{NH}_3$, $p=0,5$ атм. Развертка 100 мкс/дел. Получен квазипрерывный режим генерации при частоте следования импульсов фотоионизации 10 кГц.

5. Заключение.

Исследованы источники коротковолнового УФ излучения на основе многоазорного сильноточного разряда короткой длительности. При плотности расположения искровых промежутков на излучающей поверхности порядка 1 см^{-2} и умеренных энерговкладах $W=0,01-1 \text{ Дж/см}^2$ интенсивные вспышки дальнего УФ излучения ($\lambda < 120 \text{ нм}$, $E_{\text{ф}} > 10 \text{ эВ}$) получены за счет уменьшения искровых зазоров до величины $d < 1 \text{ мм}$, оптимизации числа зазоров $n > 20$ и согласования RCL-контура, а также за счет быстрого подвода энергии к плазме микрошнуров с производной тока $dl/dt > 10^9 \text{ А/с}$. Эффективность генерации УФ не снижалась при переходе от скользящего разряда к режиму свободных искр, оторванных от поверхности. В последнем случае возможен длительный режим повторения стабильных импульсов фотоионизации. Источник эффективно работал в лазерных средах, в которых буферными газами являлись N_2 , Ar , He при давлении $p=0,1-1$ атм. При снижении энерговклада в искровой промежутке до $W=0,01 \text{ Дж}$ достигнута частота следования УФ излучения $f = 20 \text{ кГц}$. Показано, что использование неэлектроотрицательной присадки (NH_3 , Xe), которая обуславливает рекомбинационный распад плазмы, ведет к затягиванию распада плазмы после отключения внешнего ионизатора. Эффект проявляется сильнее при повышенном значении E/p , так как коэффициент рекомбинации при этом падает. Получены оптимальные энергетические характеристики при исследовании фотоионизационного разряда в лазерных средах. Для поддержания фотоионизационного разряда использованы молекулярные и атомарные газовые присадки с потенциалом ионизации $U_i = 9,25-14 \text{ эВ}$ (NO , NH_3 , C_2H_4 , CF_3 , I_2 , Xe , O_2), обеспечивающие

точную дозировку в потоке газа и имеющие низкую температуру кипения. На примере CO_2 - лазерных сред продемонстрирована эффективность фотоионизационной системы накачки, которая обладает технической простотой, компактностью, отсутствием рентгеновского излучения. Достигнуты оптимальные по приведенному электрическому полю $E/p=5-7$ кВ/см·атм и удельному энерговыделению $W=0,3$ Дж/см³·атм режимы возбуждения CO_2 – лазерных сред, при этом энергозатраты на фотоионизацию составили < 30 % от энерговыделения в разряд. Получен квазинепрерывный режим горения разряда и лазерной генерации CO_2 – лазера при частоте следования импульсов фотоионизации $f > 10\%$ кГц. Достигнуты оптимальные режимы возбуждения CO_2 - лазерных сред при условии, что концентрация $\text{CO}_2 < 5\%$ в рабочей смеси газов, включающей $\text{N}_2:\text{He}$.

6. Литература.

1. Велихов Е.П., Письменный В.Д., Рахимов А.Т. Независимый газовый разряд, возбуждающий непрерывные CO_2 -лазеры.// Успехи физических наук, т.122, вып.3, сс. 419-502, (1977).
2. Газовые лазеры. Под ред. Мак-Даниэля И., Нигэна У. Пер. с англ.- М.: Мир, 1981, - 504 с.
3. Richardson M.C., Leopold K. Multiple arc radiation preionizer for gas laser. US Patent No 4041414, Aug. 9, 1977.
4. Абросимов Г.В., Клоповский К.С., Польский М.М., Пулинец Т.С., Саенко В.Б., Суетин Н.В. Исследование характеристик скользящего разряда и его использование для объемной фотоионизации газовых сред. - В кн.: Возникновение и развитие газового разряда при высоких давлениях. Тарту, 1984, часть II, с.220-222.
5. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. Фотоионизационная система накачки для технологических газовых лазеров. - В кн.: Применение лазеров в народном хозяйстве. III Всес. конф., Шатура, 1989, часть I, с.20-21.
6. Ф. Фрюнгель. Импульсная техника. "Энергия", М-Л, 1965г.
7. Методы исследования быстрых реакций. Ред. Г. Дж. Хеммис. "Мир", М, 1977.
8. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. "Мир", М, 1972.
9. Г. А. Месяц. Генерирование мощных наносекундных импульсов. "Сов. Радио", М, 1974.

Александр Турсунович Рахимов
Владимир Борисович Саенко

**ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОИОНИЗАЦИИ
ЛАЗЕРНЫХ СРЕД.**

Препринт НИИЯФ МГУ –2004 –16/755

Работа поступила в ОНТИ 02. 09. 2004 г.

ИД № 00545 от 06.12.1999

Издательство
Учебно-научного центра довузовского образования

117246, Москва, ул. Обручева, 55А, УНЦ ДО
Тел./факс. (095) 718-6966, 718-7785
e-mail: izdat@abiturcenter.ru
<http://www.abiturcenter.ru/izdat/>

Заказное. Подписано к печати 02.09. 2004г. Формат 60х90/16
Бумага офсетная № 2. Усл. печ. л 0,9
Тираж 30 экз. Заказ № 659

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО
<http://abiturcenter.ru/print>
в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинала-макета