

ЧАСТОТНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д.Л. Кузнецов, А.В. Малыгин, Ю.Н. Новоселов, С.Н. Рукин, Е.А. Харлов
*Институт электрофизики УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106. nov@ier.uran.ru*

В настоящее время плазмохимические процессы в ионизованных газовых смесях являются предметом всестороннего изучения во многих странах, поскольку на основе таких процессов разрабатываются новые технологии очистки газообразных выбросов от токсичных примесей, создаются газовые лазеры и т.п. Наиболее эффективными способами инициирования плазмохимических процессов являются электрофизические, а именно: зажигание разрядов в газовых смесях (например, стримерная корона), облучение газовых смесей электронными пучками, формирование объемных разрядов, иницируемых либо поддерживаемых электронными пучками.

Основные преимущества импульсных электронных пучков по сравнению с непрерывными заключаются в возможности регулировать параметры пучка (плотность тока и длительность импульса) в широком диапазоне значений, что позволяет осуществлять оптимальную организацию плазмохимических процессов для каждой конкретной газовой смеси. Энерговклад в облучаемую смесь можно регулировать путем изменения частоты следования импульсов электронного пучка, что особенно важно при облучении газовых потоков.

Использование импульсных пучков электронов с повышенной плотностью тока и регулируемой длительностью позволило существенно снизить затраты энергии на удаление из воздуха диоксида серы [1] и сероуглерода [2] в результате организации цепных механизмов окисления примесей. Применение импульсных пучков позволяет также реализовать в качестве конечных продуктов иные, чем при непрерывном облучении, вещества. Такие результаты получены в экспериментах по удалению оксидов азота [3], сероуглерода [2] и паров стирола [4] из воздуха.

На основе имеющихся результатов можно сформулировать основные требования к импульсным ускорителям электронов, которые могли бы использоваться в качестве универсального средства для инициирования плазмохимических процессов в газовых смесях различного состава, стационарных либо движущихся с различными скоростями:

1. Параметры импульса электронного пучка (плотность тока и длительность импульса) должны регулироваться в широком диапазоне значений для поиска оптимальных режимов облучения каждой конкретной смеси.

2. Энергия электронов пучка должна регулироваться от сотни кэВ до нескольких сотен кэВ (вплоть до 1 МэВ) для возможности облучения различных газовых объемов.

3. Частота следования импульсов также должна регулироваться в диапазоне от одиночных импульсов до единиц килогерц, что позволит облучать как стационарные газовые смеси, так и газовые потоки, движущиеся с большими скоростями.

4. Ускоритель должен иметь надежный источник питания, долговечный катод и надежную охлаждаемую выводную фольгу, что обеспечит бесперебойную работу ускорителя в течение длительного времени.

Создать ускоритель, отвечающий одновременно всем перечисленным требованиям, очень сложно. В настоящей работе описан импульсно-периодический наносекундный ускоритель электронов, который удовлетворяет большей части из этих требований и может быть использован для решения широкого круга задач в области плазмохимии.

Ускоритель состоит из двух основных элементов – генератора мощных наносекундных импульсов СМ-3Н и вакуумного диода со взрывоэмиссионным катодом. Генератор СМ-3Н включает в себя индуктивный накопитель энергии и полупроводниковый прерыватель тока на основе SOS-диодов. Устройство и принцип

работы таких генераторов представлены в [5]. Полностью твердотельная система коммутации энергии в данном устройстве позволяет снять принципиальные ограничения как по частоте следования импульсов, так и по ресурсу работы, что является важным преимуществом этой системы по сравнению с генераторами на основе газоразрядных коммутаторов. Конструктивно генератор СМ-3Н выполнен в настольном варианте. Габариты корпуса – $0.8 \times 0.6 \times 0.4 \text{ м}^3$, масса вместе с трансформаторным маслом – около 110 кг. В воздушной части внутри корпуса расположены элементы зарядного устройства, первичный накопитель и тиристорный ключ, охлаждаемые тремя встроенными вентиляторами. Элементы высоковольтного модуля расположены в баке из нержавеющей стали, заполненном трансформаторным маслом. Масло в баке охлаждается проточной водой с помощью водяной рубашки. Генератор СМ-3Н формирует на выходе импульсы напряжения амплитудой до 400 кВ и длительностью на полувысоте около 40 нс. Основным ограничением, накладываемым на частоту следования импульсов генератора, является нагрев его элементов. По условиям теплоотвода генератор СМ-3Н рассчитан на постоянную работу с частотой 200 Гц либо на кратковременную (до 30 секунд) работу с частотой до 1 кГц.

Устройство вакуумного диода приведено на рис.1.

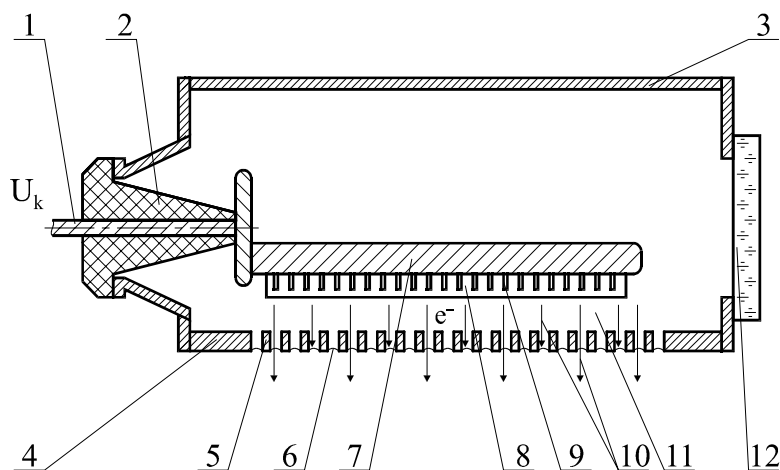


Рис.1. Устройство вакуумного диода.

Импульсное выходное напряжение питающего генератора U_k по высоковольтному токовводу 1 через проходной изолятор 2 подается на взрывоэмиссионный катод 7, расположенный внутри вакуумной камеры 3. Напряжение прикладывается между катодом 7 и анодом, в качестве которого служит охлаждаемая водой медная решетка 5, вмонтированная в опорную плиту 4. Катод 7 представляет собой дюралюминиевый стержень длиной 80 см, в котором закреплены два ряда керамических пластин 8 и два ряда металлических острий 9, находящихся в упругом контакте с керамическими пластинами. При подаче импульса напряжения между катодом и анодом на концах металлических острий 9 происходит взрывная электронная эмиссия с образованием катодной плазмы. Электроны 10 поступают из плазмы в ускоряющий промежуток 11 между катодом и анодом, ускоряются в нем и приобретают энергию, определяемую приложенным напряжением. Часть ускоренных электронов поглощается медной решеткой 5 и выводной алюминиево-магниевой фольгой 6 толщиной 50 мкм и размером $85 \times 8 \text{ см}^2$. Другая часть электронов проходит через отверстия медной решетки и выводную фольгу и образует электронный пучок, попадающий в плазмохимическую камеру, заполненную исследуемой газовой смесью. Окно из оргстекла 12 позволяет с помощью телекамеры наблюдать за катодом 7 и ускоряющим промежутком 11 в процессе работы ускорителя. Система управления включает генератор Г5-56, используемый для запуска высоковольтного генератора СМ-3Н. Газовакуумная система состоит из форвакуумного насоса ЗНВР-5ДМ,

диффузионного паромасляного насоса Н-160 и вакуумметра ВИТ-2. Во время работы ускорителя контролируются напряжение на катоде U_k и полный ток пучка I_p . Перед присоединением плазмохимической камеры производится измерение тока пучка $I_{па}$, выведенного через фольгу в атмосферу, с помощью токового коллектора. Регистрация перечисленных параметров осуществляется с помощью цифрового четырехканального осциллографа Tektronix TDS644В с полосой пропускания 500 МГц. Полная погрешность измерения выходных параметров ускорителя не превышает 10-15%.

На рис.2 представлены осциллограммы ускоряющего напряжения на катоде U_k и полного тока пучка I_p в ускоряющем промежутке при различных расстояниях между катодом и анодом.

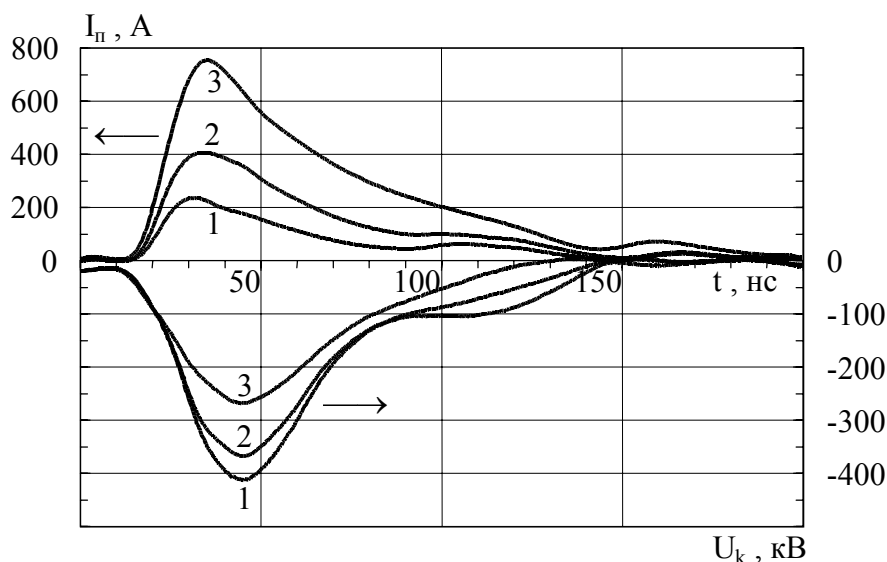


Рис.2. Осциллограммы ускоряющего напряжения на катоде U_k и полного тока пучка I_p в ускоряющем промежутке при расстояниях катод-анод $d = 166$ мм (1), $d = 78$ мм (2), $d = 22$ мм (3).

Увеличение расстояния приводит к росту импеданса вакуумного диода, представляющего собой внешнюю нагрузку для питающего генератора. Поскольку генератор основан на индуктивном накопителе энергии, то рост импеданса приводит к увеличению выходного напряжения и снижению тока при заданной величине энергии накопителя. Максимальное напряжение на катоде достигается при $d = 166$ мм и составляет 410 кВ при длительности импульса на полувысоте около 40 нс и полном токе электронного пучка 235 А. При уменьшении d до 22 мм ток пучка возрастает до ~800 А при напряжении на катоде около 270 кВ. Максимальное значение тока пучка достигается при $d = 13$ мм и составляет 1130 А. Длительность импульсов тока на полувысоте также около 40 нс, а их форма повторяет форму импульсов ускоряющего напряжения.

На рис.3 приведены осциллограммы тока пучка $I_{па}$, выведенного через фольгу в атмосферу, при разных d . Импульсы обладают более короткими временами нарастания и спада и меньшей длительностью на полувысоте (~30-35 нс), что объясняется низким значением коэффициента прохождения электронов через фольгу при энергиях менее 100 кэВ, в результате чего практически все электроны пучка, ускоренные на начальном участке фронта и на конечном участке спада импульса напряжения, поглощаются фольгой. Измерение распределения плотности тока пучка по длине фольги показало, что в рабочей области фольги ($10 < x < 75$ см) отклонение плотности тока пучка от среднего значения не превышает 30%.

При изменении расстояния между катодом и анодом выяснилось, что ускоряющее напряжение монотонно возрастает с ростом d .

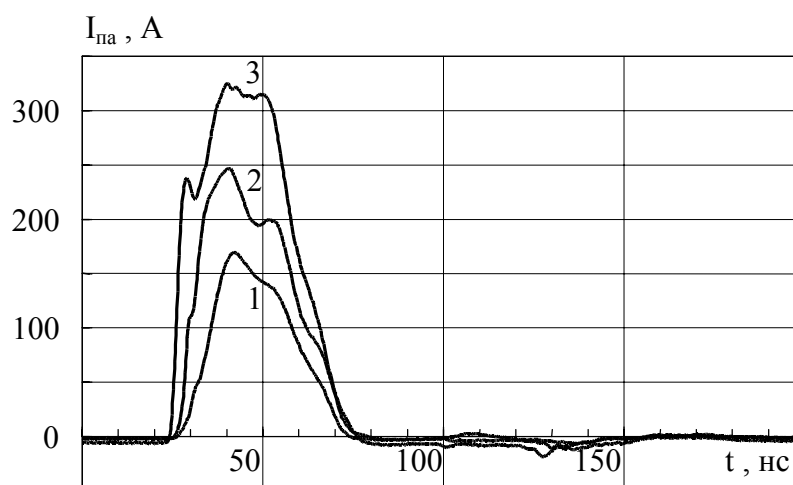


Рис.3. Осциллограммы тока пучка $I_{\text{пa}}$, выведенного в атмосферу, при расстояниях катод-анод $d = 166$ мм (1), $d = 78$ мм (2), $d = 22$ мм (3).

Максимальное значение энергии электронного пучка (~ 7 Дж) и импульсной мощности (~ 180 МВт) достигается при $d \sim 20 - 30$ мм. При этом расстоянии импеданс вакуумного диода становится близким к значению внутреннего сопротивления питающего генератора, что позволяет реализовать режим передачи максимальной мощности от генератора в электронный пучок.

Испытания ускорителя при различных частотах следования импульсов показали, что зависимость средней мощности электронного пучка от частоты близка к линейной. Средняя мощность пучка достигает ~ 1 кВт при длительной работе на частоте 200 Гц и ~ 4 кВт при кратковременной (30 секунд) работе на частоте 1 кГц.

Таким образом, созданный ускоритель электронов может рассматриваться как универсальный инструмент для экспериментальных исследований плазмохимических процессов в газовых смесях различного состава. Возможность варьирования плотности тока пучка позволяет подбирать оптимальные условия облучения в каждом конкретном случае. Регулирование энергии электронов пучка в широком диапазоне дает возможность равномерно облучать различные газовые объемы. Изменяя частоту следования импульсов, можно обрабатывать пучком как стационарные газовые объемы, так и газовые потоки.

Частотный наносекундный ускоритель электронов, описанный в данной работе, планируется использовать для исследования плазмохимических процессов в экспериментах по удалению летучих органических соединений из воздуха, разложению метана, накачке газовых лазеров и нанесению тонких органических пленок на различные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Novoselov Y.N., Mesyats G.A., Kuznetsov D.L. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V.34. № 8. P. 1248.
2. Denisov G.V., Kuznetsov D.L., Novoselov Yu.N., Suslov A.I., Uster A.M. // *Proc. XIII International Conference on High Power Particle Beams (25-30 June 2000, Nagaoka, Japan)*. PB-049. P.645.
3. Novoselov Yu.N., Denisov G.V., Kuznetsov D.L., Tkachenko R.M. // *Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials (24-29 September 2000, Tomsk, Russia)*. V.2. P.501.
4. Filatov I.E., Novoselov Yu.N., Surkov Yu.S. // *Proc. XIII International Conference on High Power Particle Beams (25-30 June 2000, Nagaoka, Japan)*. PB-050. P.649.
5. Rukin S.N. // *Instruments and Experimental Techniques*. 1999. V.42. P.439.