

ГЕНЕРАТОРЫ ДИФФУЗНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2017 г. М. В. Ерофеев*, В. С. Рипенко, М. А. Шулепов, В. Ф. Тарасенко

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: mve@loi.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2016 г.

Описаны устройства, формирующие низкотемпературную диффузную плазму наносекундного разряда в потоке различных газов при атмосферном давлении. Для формирования диффузной плазмы на промежутке “острие–плоскость” в импульсно–периодическом режиме подавались импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой несколько десятков киловольт и длительностью 5 нс. Варьируя геометрию разрядного промежутка, форму катода и состав рабочего газа, можно получать плазму с широким диапазоном параметров и проводить модификацию поверхности различных материалов площадью до нескольких десятков квадратных сантиметров.

DOI: 10.7868/S0032816217020033

Низкотемпературная неравновесная плазма широко применяется в современной микро- и нанoeлектронике, медицине и биомедицинских технологиях. Наиболее перспективными из имеющихся на сегодняшний момент источников низкотемпературной плазмы являются объемные разряды, инициируемые электронными лавинами (о.р.э.л.) в различных газах атмосферного давления, что позволяет существенно упростить технологический процесс модификации поверхностных свойств различных материалов.

Генерация разряда такого типа обычно происходит в сильно неоднородном электрическом поле, сформированном электродами с малым радиусом кривизны при подаче на них импульсов напряжения амплитудой >100 кВ, длительностью единицы–десятки наносекунд и с субнаносекундной длительностью фронта [1]. Электроды с малым радиусом кривизны обеспечивают усиление электрического поля, вследствие чего происходит генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения, что приводит к предыонизации разрядного промежутка и обеспечивает диффузный характер разряда в газах при повышенных давлениях.

Такие источники позволяют при малых частотах повторения импульсов (менее 10 Гц) получать плотную плазму наносекундного разряда с удельной мощностью энерговыклада сотни мегаватт на кубический сантиметр [2]. Концентрация электронов и их температура в плазме о.р.э.л. зависит от амплитуды импульса напряжения и его временных характеристик, а также от геометрии раз-

рядного промежутка. При атмосферном давлении гелия и азота средняя температура электронов в плазме о.р.э.л., формируемого генератором РАДАН-220, составляет несколько электронвольт [3], а концентрация электронов $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$ [3] и $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$ [4] соответственно. В качестве рабочих газов также могут использоваться инертные газы [5], воздух, элегаз [6] и метан [7].

В работе [8] была показана возможность использования режима о.р.э.л. для создания источников диффузной плазмы, работающих при частоте следования импульсов до 2 кГц. Максимальная концентрация электронов в плазме объемного разряда атмосферного давления достигается в центре межэлектродного промежутка и составляет: $\sim 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ в аргоне, $\sim 4 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$ в азоте, $\sim 3 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$ в воздухе. Максимальная температура электронов составляет 3.5 эВ в азоте и 3 эВ в воздухе. Кроме того, диффузные разряды могут генерировать перекрывающиеся в газоразрядном промежутке плазменные каналы без образования искры, что позволяет обеспечивать удовлетворительную однородность воздействия на обрабатываемую поверхность при атмосферном давлении.

Таким образом, источники, способные генерировать низкотемпературную плазму на основе о.р.э.л. в различных газах атмосферного давления, имеют высокую активность плазмохимических процессов и допускают возможность варьирования электронной плотности, температуры и степени ионизации, что позволяет использовать

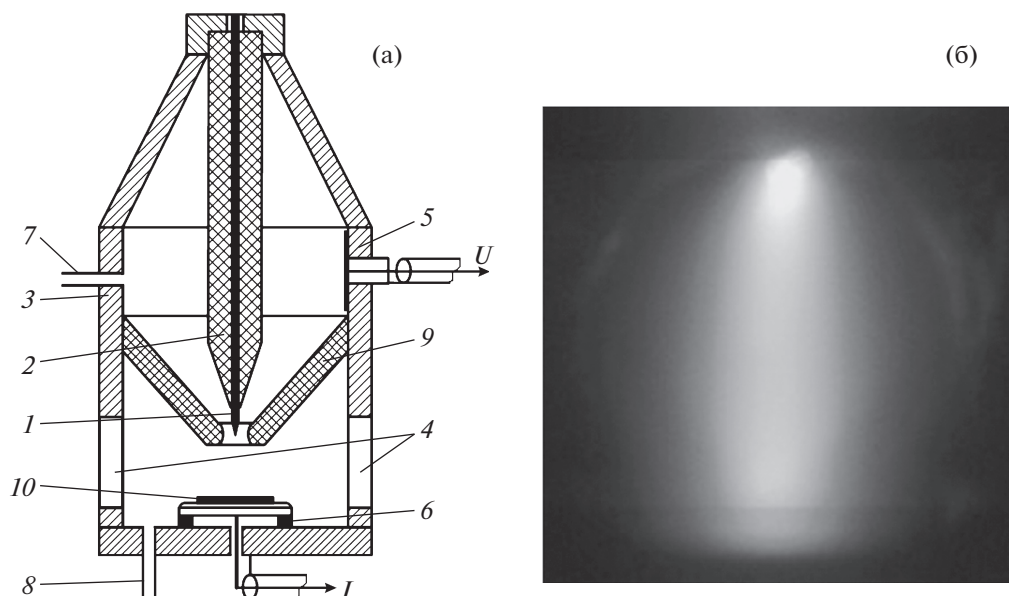


Рис. 1. а – конструкция генератора плазмы № 1: 1 – острый катод, 2 – капролоновый изолятор, 3 – металлический корпус, 4 – кварцевые окна, 5 – емкостный делитель, 6 – токовый шунт, 7 – напуск газа, 8 – выхлоп газа, 9 – форсунка, 10 – анод; б – фотография свечения диффузной плазмы разряда в потоке азота.

их для модификации поверхности различных материалов, в том числе термочувствительных.

Цель данной работы – создание установок для обработки поверхностей различных металлов и диэлектриков плотной плазмой при атмосферном давлении воздуха и других газов.

Одна из конструкций генератора диффузной плазмы, позволяющего модифицировать поверхности плоских круглых образцов диаметром до 10 мм, показана на рис. 1.

Генератор содержит острый катод 1 с малым радиусом кривизны, изготовленный из инструментальной стали, который впрессован в капролоновый изолятор 2. Контроль работы генератора осуществлялся визуально через кварцевые окна 4 диаметром 20 мм, выполненные в металлическом корпусе 3, а также путем измерения напряжения на разрядном промежутке емкостным делителем 5 и тока разряда шунтом 6, изготовленным из низкоиндуктивных чип-резисторов.

Рабочий газ в разрядную камеру подавался через отверстие 7, выходные отверстия 8 расположены в нижней части корпуса 3. Поток газа, направленный вдоль катода, формировался конической капролоновой форсункой 9. Расстояние от острейшего катода до плоского анода 10, на котором располагался модифицируемый образец, можно изменять в диапазоне 1–20 мм. На рис. 1б показана фотография свечения диффузной разрядной плазмы в потоке азота при скорости прокачки 5 л/мин, частоте повторения импульсов на-

пряжения 40 Гц и межэлектродном промежутке 12 мм, катод расположен сверху.

Генератор другой конструкции (рис. 2) позволяет модифицировать поверхности плоских образцов размером 10×130 мм. Катод 1 длиной 130 мм изготовлен из 18-ти стальных игл, расположенных в ряд на расстоянии 8 мм друг от друга. Корпус генератора изготовлен из полихлорвиниловой трубы 2 диаметром 100 мм, на торцах которой расположены штуцеры 3 для напуска рабочего газа. В нижней части трубы, под каждым игольчатым электродом, выполнены отверстия 4, через которые выдувается газоразрядная плазма. Расстояние между катодом 1 и плоским анодом 5, на котором располагается исследуемый образец, варьируется в пределах 10–20 мм.

Форма разряда (рис. 2б) представляет собой светящиеся диффузные конические струи с вершинами у острий игл и перекрывающимися основаниями. Расстояние от каждой иглы до анода настраивается таким образом, чтобы все струи имели одинаковую интенсивность свечения, а основания конических каналов равномерно перекрывались, обеспечивая равномерную засветку модифицируемой поверхности.

Питание генераторов осуществлялось от высоковольтных источников типа ГИН-100-1 [9] и NPG-18/3500N [10], формирующих при работе на согласованную нагрузку импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой падающей волны 14–52 кВ и длительностью 3–5 нс, следующих с частотами до 3.5 кГц.

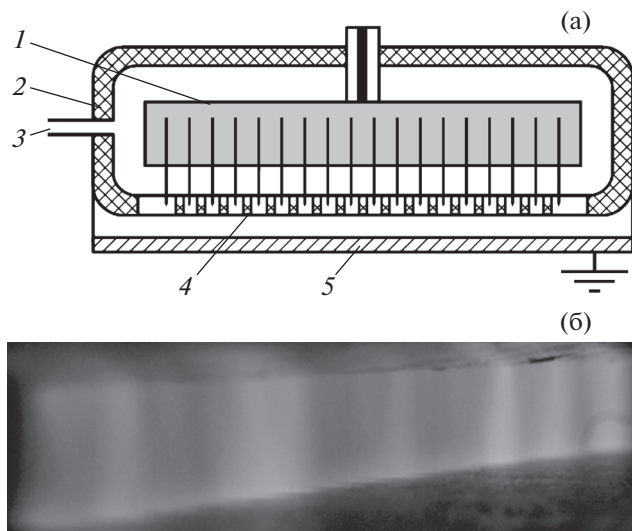


Рис. 2. а – конструкция генератора плазмы № 2: 1 – игольчатый катод, 2 – полихлорвиниловый корпус, 3 – напуск газа, 4 – прорезь для выхода плазмы, 5 – анод; б – фотография свечения диффузной плазмы, снятая под углом 45° к оси разрядного промежутка.

В зависимости от межэлектродного зазора и амплитуды импульса напряжения можно изменять режимы формирования плазмы. На рис. 3 представлены осциллограммы тока разряда и импульса напряжения на разрядном промежутке при больших зазорах, снятые с помощью токового шунта и емкостного делителя напряжения на генераторе № 1 осциллографом Tektronix TDS-3034.

Согласно рис. 3, импульсы напряжения частично отражаются от нагрузки (разрядный промежуток), а затем от источника напряжения (при этом они меняют полярность за счет существенного падения его внутреннего сопротивления) и снова попадают на разрядный промежуток. При больших зазорах амплитуда второго импульса напряжения соизмерима с амплитудой первого. Время, через которое отраженный импульс возвращается на разрядный промежуток, равно времени его двойного прохода по длине высоковольтного кабеля, по которому подается напряжение. Таким образом, на промежуток приходит последовательность из основного импульса генератора и нескольких отраженных импульсов чередующейся полярности. Импульсная пиковая вкладываемая мощность в первом импульсе составила 475 кВт, во втором – 420 кВт. Следовательно, кроме ультрафиолетового, вакуумного ультрафиолетового излучения плазмы диффузного разряда [11], а также характеристического излучения с малой энергией рентгеновских квантов [12–14], на плоский электрод оказывают воздействие как пучок электронов, так и положительно заряженные ионы.

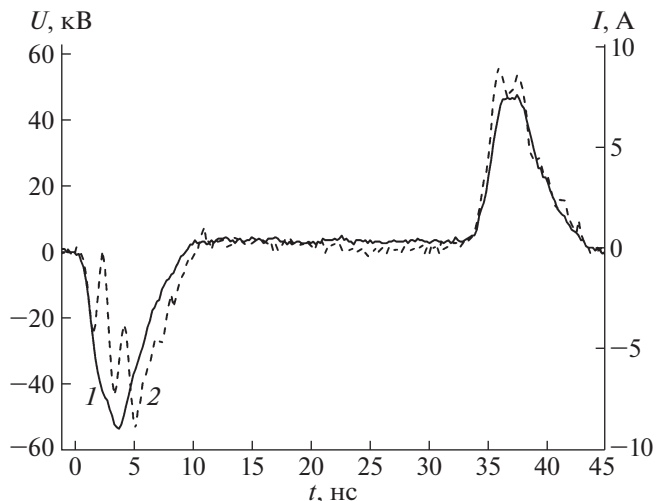


Рис. 3. Характерные осциллограммы работы генератора № 1 при питании от источника ГИН-100-1: 1 – напряжение на разрядном промежутке, 2 – ток разряда.

При уменьшении межэлектродного зазора вкладываемая мощность в первом импульсе увеличивается, а во втором – уменьшается.

Описанные генераторы позволяют создавать диффузную низкотемпературную плазму разрядов в потоке различных газов при атмосферном давлении, что имеет большое практическое значение при исследовании воздействия плазмохимических процессов на поверхность различных материалов.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Runaway electrons preionized diffuse discharge / Ed. by V.F. Tarasenko. N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 2015.
2. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007.
3. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Кривоногова К.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. № 1. С. 40.
4. Сорокин Д.А., Ломаев М.И., Банюкина Т.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 8. С. 13.
5. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576.
6. Bakst E.Kh., Burachenko A.G., Erofeev M.V., Lomaev M.I., Rybka D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. // Laser Physics. 2008. V. 18 (6). P. 732. doi 10.1134/S1054660X08060078
7. Lomaev M.I., Tarasenko V.F., Sorokin D.A., Rybka D.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39(11). P. 2088. doi 10.1109/TPS.2011.2159390

8. *Sorokin D.A., Lomaev M.I., Tarasenko V.F.* // Proc. of SPIE. 2015. V. 9810. 98101M-2. doi 10.1117/12.2225192
9. *Efanov V.M.* // IEEE. Conference Record of the 2000 Twenty-Fourth International Power Modulator Symposium. 50th Anniversary. 2000. P. 66. doi 10.1109/MODSYM.2000.896166
10. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л.* // ПТЭ. 2012. № 5. С. 99.
11. *Ерофеев М.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* // ПТЭ. 2012. № 4. С. 70.
12. *Ерофеев М.В., Бакирт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 52.
13. *Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакирт Е.Х., Шутько Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 22. С. 26.
14. *Бакирт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 5. С. 480.