

УДК 533.9.15

Генерация высоковольтных импульсов в автоколебательном разряде

К. М. Гуторов, И. В. Визгалов, В. А. Курнаев

Показана возможность генерации высоковольтных импульсов в автоколебательном режиме горения пучково-плазменного разряда. Импульсы отрицательного напряжения с амплитудой до 40 кВ регистрируются на контактирующем с плазмой электроде, постоянное отрицательное напряжение смещения которого составляет 200—300 В.

PACS: 52.35.Hr, 52.35.Qz, 52.40.Hf, 52.59.Mv

Ключевые слова: автоколебательный разряд, высоковольтные импульсы.

Введение

Условием возникновения автоколебаний является наличие неустойчивости электрического контакта между электродом и плазмой разряда, обусловленной N-образной мгновенной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) электрода с повышенной электрон-электронной эмиссией. Падающий участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением способствует развитию неустойчивости, при этом катод работает как усилительный элемент. Изменение параметров разрядного контура позволяет получать различные режимы возбуждения автоколебаний, причем это могут быть релаксационные автоколебания или квазигармонические сильноточные автоколебания.

Проведенный ранее анализ релаксационного режима показал, что при увеличении внешней индуктивности в цепи питания будет расти амплитуда импульсов напряжения на электроде, что позволило бы при должной высоковольтной изоляции получать импульсы с напряжением в несколько десятков киловольт [1]. Такие импульсы могут быть использованы для ускорения ионов в приповерхностном слое и для облучения поверхности. В случае имплантации дейтерия с энергией в несколько десятков кэВ возможно протекание $d-d$ -реакции с образованием нейтронов, и тогда такая система может использоваться в качестве нейтронного генератора.

Возбуждение высоковольтных колебаний релаксационного типа

Для предельного случая автоколебательного режима высоковольтные импульсы в разряде формируются, когда внешняя индуктивность L в цепи питания, контактирующего с плазмой электрода, очень велика и $\frac{L}{R} \gg |R_i| \cdot C_N$,

где R — внутреннее сопротивление источника питания;

R_i — эффективное сопротивление контакта плазмы и электрода;

C_N — емкость приэлектродного слоя.

Колебания в системе будут иметь релаксационный характер, причем поскольку ионная ветвь ВАХ проходит почти горизонтально и близко к оси $I = 0$, то автоколебания должны развиваться в форме периодических высоковольтных импульсов [1]. Наблюдаемые экспериментально автоколебания этого типа действительно сопровождаются значительными бросками напряжения ($\gg 1$ кВ) с очень крутыми фронтами (порядка более 1 кВ/нс).

Проведенные численные расчеты также показывают возможность формирования высоковольтных импульсов при следующих характерных экспериментальных условиях: максимальный ток $I_{\max} = 2$ А, ток ионного насыщения $I_{\min} = 0,4$ А, положение рабочей точки $U_0 = -300$ В, сопротивление источника питания $R = 300$ Ом, эффективное сопротивление контакта плазмы и электрода $R_i = 10$ Ом, внешняя индуктивность $L = 10^{-3}$ Гн, площадь катода $S = 10$ см², водородная плазма. Если считать, что энергия индуктивности полностью переходит в энергию плазменно-поверхностного конденсатора C_N , то без учета его разрядки амплитуда импульсов составит порядка 200 кВ. Реально импульс имеет конечный фронт, и ток разрядки по ионной ветви ВАХ значительно

Гуторов Константин Михайлович, доцент.

Визгалов Игорь Викторович, доцент.

Курнаев Валерий Александрович, профессор, зав. кафедрой.
Национальный исследовательский ядерный университет
"МИФИ".

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

E-mail: gkost@pochta.ru

Статья получена 20 июня 2011 г.

© Гуторов К. М., Визгалов И. В., Курнаев В. А., 2011

уменьшает предельное напряжение. С учетом скорости роста напряжения на фронте импульса ($0,4 \cdot 10^{12}$ В/с при напряжении 1 кВ) длительность всего высоковольтного импульса составляет порядка 50 нс, а его амплитуда — порядка 10 кВ, что действительно и наблюдается экспериментально. При этом необходимо, чтобы была обеспечена высоковольтная изоляция электродной системы. Иллюстрации (рис. 1 и 2) отражают рост напряжения в импульсе с ростом внешней индуктивности.

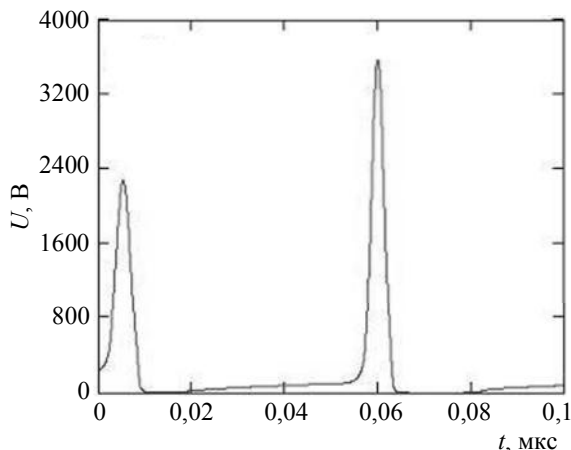


Рис. 1. Расчетные колебания при величине внешней индуктивности $L = 3$ мкГн

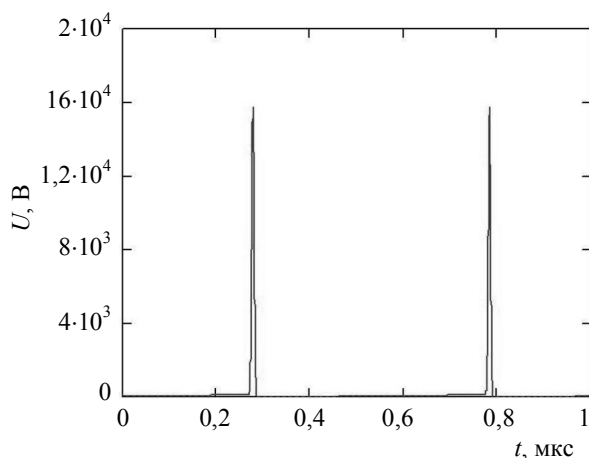


Рис. 2. Расчетные колебания при величине внешней индуктивности $L = 30$ мкГн

В ходе экспериментов для получения высоковольтных импульсов увеличение индуктивности сопровождалось ростом амплитуды в соответствии с расчетом лишь до значений порядка 10 кВ, после чего рост амплитуды прекратился. Этот предел связан с ростом ионной ветви ВАХ электрода вследствие высокой вторичной ион-электронной эмиссии в этом диапазоне энергии, что не было учтено в расчетах. Также значительную роль в параметрах колебательного контура начинает играть паразитная емкость индуктивности (увеличиваю-

щаяся с ростом индуктивности), шунтирующая ее по высокой частоте.

Возбуждение высоковольтных импульсов в режиме со срывами генерации

Импульсов с напряжением в десятки киловольт удалось добиться только при значительном повышении внешней индуктивности, относительно рассчитанной в модели релаксационных колебаний. При этом механизм формирования импульсов отличается от изложенного ранее [1]. Индуктивность перестает быть частью колебательного контура (из-за сильно растущей паразитной емкости) и становится фильтром постоянного тока от источника питания. В разряде возникают сильноточные высокочастотные колебания [2], при этом растут плотность плазмы и ток источника питания, энергия индуктивности повышается. В определенный момент происходит срыв высокочастотных колебаний и вся запасенная энергия расходуется на повышение напряжения электрода, которое может достигать значений в десятки киловольт. Срыв происходит при резком снижении эмиссионного тока с покрытого диэлектрической пленкой электрода. Это является результатом перехода поверхности электрода в проводящее состояние вследствие уменьшения толщины пленки до значений, когда она становится проводящей, или в результате изменения ее проводимости под действием интенсивного облучения. В эксперименте фронт импульса затянут, что может объясняться утечками тока через основной канал разряда и через паразитные пробой.

После прохождения высоковольтного импульса пленка на поверхности восстанавливает свои диэлектрические свойства и вновь наблюдается генерация высокочастотных колебаний с последующим срывом в высоковольтный импульс. Максимальное значение напряжения в импульсе достигает 40 кВ, что вполне достаточно для протекания $d-d$ -реакции с образованием нейтронов.

Ниже приведены осциллограммы (рис. 3, 4), демонстрирующие срыв высокочастотного разряда в высоковольтный импульс. Результаты получены при следующих параметрах разряда: давление рабочего газа (водород) $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ Па; магнитное поле — 1 кГс (ток в катушках 500 А); отрицательное напряжение смещения холодного катода — 100—200 В; ток первичного электронного пучка — 50 мА; ускоряющее напряжение электронной пушки — 1 кВ.

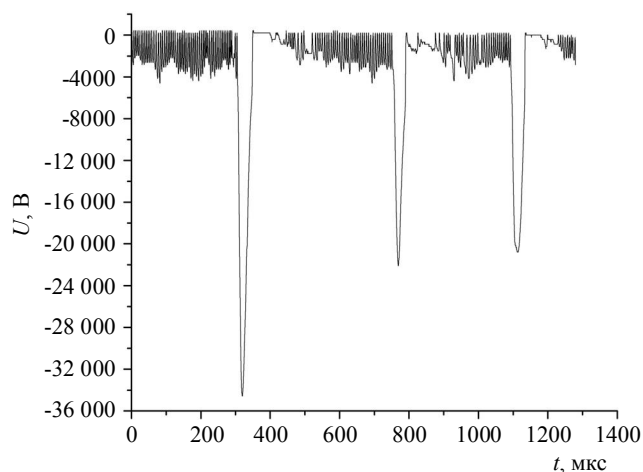


Рис. 3. Серия высоковольтных импульсов, предваряемых высокочастотными колебаниями

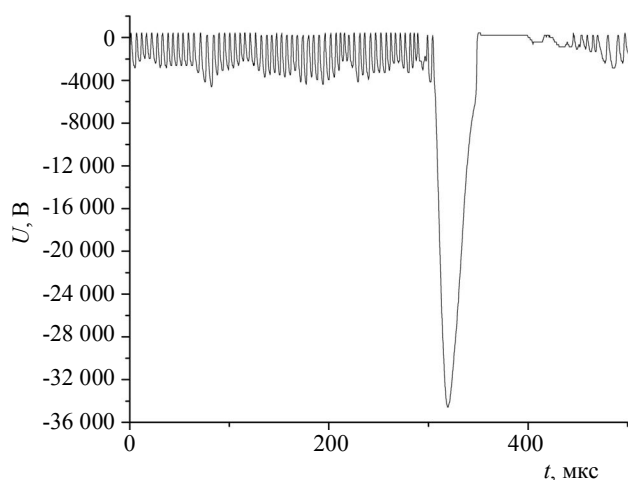


Рис. 4. Подробное изображение импульса

Период следования импульсов составляет 300—400 мкс, ширина импульса около 40 мкс, промежуток до начала следующей генерации 60—80 мкс. Частота предваряющих колебаний составляет 500 кГц и определяется внешней индуктивностью, причем амплитуда достигает 4 кВ при среднем значении 2 кВ.

Параметры разряда можно регулировать, меняя напряжение смещения. При уменьшении напряжения снижается амплитуда колебаний и увеличивается период следования импульсов. Также при снижении мощности можно получить автоколебательный режим без высоковольтных импульсов.

Подробное исследование структуры колебаний выявило их сложную структуру, а именно, на колебания с частотой 500 кГц накладываются коле-

бания с частотой порядка 30 МГц, соответствующие собственной частоте заполненного плазмой резонатора (рис. 5). Возбуждение таких колебаний обеспечивает высокую эффективность энерго-вклада в разряд [2].

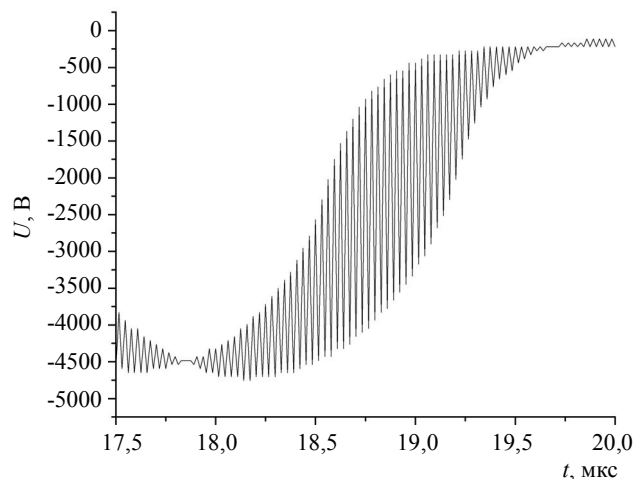


Рис. 5. Подробная форма высокочастотных колебаний: на колебания с частотой 500 кГц наложены колебания с частотой 30 МГц

Заключение

В эксперименте продемонстрирована генерация в автоколебательном разряде высоковольтных импульсов с напряжением до 40 кВ. Период следования импульсов и амплитуда колебаний регулируются внешними элементами разрядного контура, напряжением смещения электрода, вкладываемой в разряд мощностью.

Высоковольтные импульсы могут применяться для облучения поверхности электрода ускоренными ионами из плазмы.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы.

Литература

1. Акел М., Визгалов И. В., Курнаев В. А. // Инженерная физика. 2002. № 3. С. 49.
2. Гуторов К. М., Визгалов И. В., Курнаев В. А. // Прикладная физика. 2009. № 5. С. 73.

High-voltage pulse generation in the auto-oscillating discharge

K. M. Gutorov, I. V. Vizgalov, V. A. Kurnaev
National Research Nuclear University “MEPhI”,
31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: gkost@pochta.ru

The work describes the high-voltage pulses generation ability in the auto-oscillating mode of the beam-plasma discharge. Negative voltage pulses up to 40 kV are registered at the plasma facing electrode under the constant negative bias of 200—300 V.

PACS: 52.35.Hr, 52.35.Qz, 52.40.Hf, 52.59.Mv

Keywords: auto-oscillating discharge, high-voltage pulses, plasma.

Bibliography — 2 references.

Received June 20, 2011