

04;11;12

Увеличение длительности микроволнового импульса гигаваттной релятивистской ЛОВ путем обработки поверхности замедляющей системы низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком

© А.В. Батраков, К.В. Карлик, С.А. Кицанов, А.И. Климов,
И.Н. Коновалов, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, Г.Е. Озур,
И.В. Пегель, С.Д. Полевин, Д.И. Проскуровский, М.Ю. Сухов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 6 июля 2000 г.

Предложен и экспериментально проверен метод обработки поверхности изолятора, позволяющий увеличить его электрическую прочность. Использование метода дало возможность увеличить длительность импульсов излучения релятивистской лампы обратной волны с ~ 6 до ~ 30 ns при мощности излучения 3 GW.

В первых экспериментах с релятивистской лампой обратной волны (ЛОВ) с импульсной мощностью 3 GW наблюдалось самопроизвольное ограничение длительности микроволнового импульса на уровне 6 ns [1,2]. Исследования показали, что укорочение импульса вызвано появлением на поверхности замедляющей структуры взрывоэмиссионных центров, накоплением плазмы в объеме электродинамической системы как за счет развития взрывоэмиссионных процессов, так и вследствие ионной и электронной бомбардировки поверхности, частичным поглощением энергии волны электронной компоненты плазмы, приводящим к возрастанию критического тока ЛОВ и срыву генерации [3]. Таким образом, задача увеличения длительности импульса связана с подавлением или отдалением момента развития взрывной электронной эмиссии в электродинамической системе ЛОВ, т.е. с повышением ее импульсной электрической прочности в ВЧ поле.

На сегодняшний день существует ряд методов обработки поверхности с целью увеличения электрической прочности вакуумной изоляции [4–6]. Вместе с тем эти методы, как правило, не обеспечивают максимального сглаживания поверхности одновременно с ее эффективной очисткой от примесей и загрязнений. Кроме того, многие из них дороги и трудоемки.

Нами предложен новый метод повышения электрической прочности вакуумной изоляции путем обработки поверхности электродов низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП) микросекундной длительности [7,8]. Высокая плотность энергии ($\sim 10\text{--}20\text{ J/cm}^2$) и малая длительность импульса электронного пучка обеспечивают обработку поверхности в режиме как плавления, так и частичного испарения. Эффективно удаляя из его поверхностного слоя диэлектрические включения, примеси и газы и сглаживая поверхность металла, такая обработка подавляет развитие взрывной электронной эмиссии. Эксперименты показали, что при этом значительно снижается величина предпробойных токов и увеличивается электрическая прочность вакуумных промежутков. Так, в результате обработки поверхности электродов из нержавеющей стали и последующей тренировки высоковольтными импульсами (250 kV, 40 ns, 100 импульсов) была достигнута электрическая прочность миллиметрового промежутка $\sim 2.2\text{ MV/cm}$ [8].

Для обработки поверхности электродинамической системы ЛОВ, состоящей из набора колец из нержавеющей стали, нами был недавно разработан источник НСЭП с плазменным анодом, в котором анодная плазма формируется с помощью импульсного отражательного (пеннинговского) разряда в инертном газе (Ar) [9]. Такой источник отличается от использованных ранее на основе вакуумных искр [10] резким уменьшением количества продуктов эрозии, образующихся при его работе, что имеет в данном случае принципиальное значение. Параметры источника: энергия электронов 20–30 keV, длительность импульсов 2–4 μs , плотность энергии в пучке 2–20 J/cm^2 , диаметр пучка до 8 см.

Порядок обработки частей электродинамической системы ЛОВ был следующим. После токарной обработки детали электрохимически полировались в ортофосфорной кислоте. Затем, после промывки в дистиллированной воде и спирте, детали поочередно помещались в рабочую камеру источника электронов для облучения (рис. 1). Рабочая камера предварительно вакуумируется до $\sim 10^{-5}\text{ Torr}$, при этом высоковакуум-

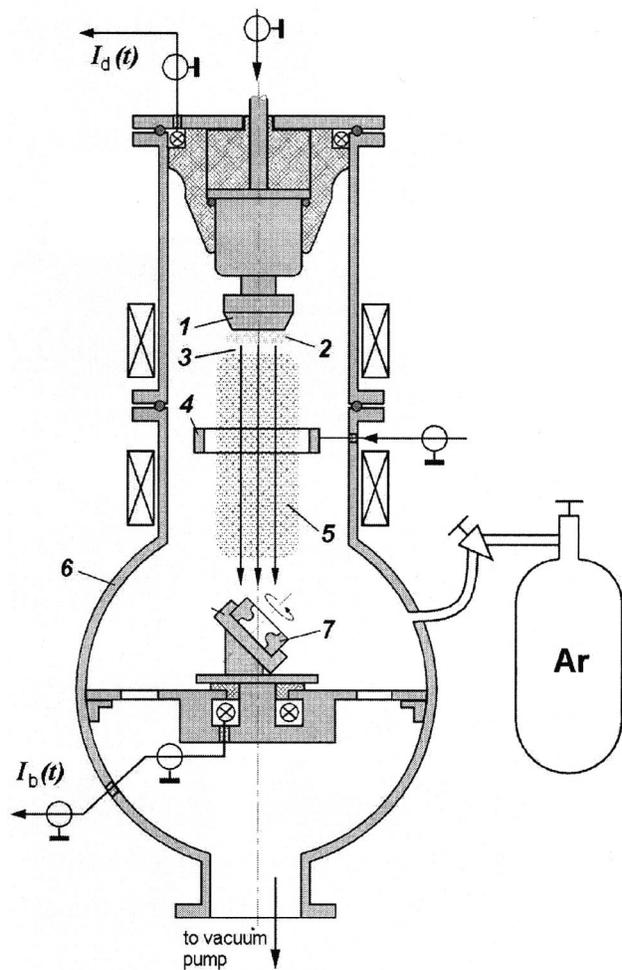


Рис. 1. Схема облучения деталей электродинамической системы ЛОВ: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — катодная плазма, 3 — двойной электрический слой, 4 — анод пеннинговской ячейки, 5 — газоразрядная анодная плазма, 6 — вакуумная камера, 7 — облучаемая деталь в манипуляторе.

ная откачка производится с использованием в диффузном насосе жидкости ФМ-1 и криогенной ловушки. Затем в камеру напускается аргон до давления $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Torr. Отражательный разряд зажигается между катодами ячейки Пеннинга (взрывоэмиссионный катод и коллектор или обрабатываемая деталь) и кольцевым анодом, охватывающим апертуру пучка, при приложении импульса напряжения 5 kV, 100 μ s к аноду. Ток разряда мог варьироваться в пределах 50–400 А. В результате горения разряда в ячейке Пеннинга формируется столб аргоновой плазмы с концентрацией $(1-5) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. Через ~ 20 μ s после зажигания разряда к взрывоэмиссионному катоду прикладывается импульс ускоряющего напряжения с фронтом менее 10 ns и амплитудой 25–40 kV. После возбуждения взрывной электронной эмиссии приложенное напряжение сосредотачивается в двойном слое между катодной и анодной плазмами, где и происходит формирование пучка. Пройдя апертуру анода, пучок транспортируется в плазме к коллектору. Внешнее магнитное поле служит для обеспечения горения отражательного разряда, а также транспортировки НСЭП.

Обработка производилась последовательно в режимах с плотностью энергии 8–10 J/cm 2 (испарение поверхностного слоя толщиной ~ 0.4 μ m и плавление на глубину до ~ 4 μ m) и 5–6 J/cm 2 (плавление на глубину до ~ 0.3 μ m без испарения). Первый режим обеспечивал удаление поверхностных включений, загрязнений и растворенных газов, второй — сглаживание поверхности. Управление режимом облучения (плотностью энергии пучка) осуществлялось путем изменения зарядного напряжения генератора импульсов, а также конфигурации и напряженности магнитного поля в источнике НСЭП. После обработки деталь охлаждалась в атмосфере аргона при давлении 50–100 Torr.

Экспериментальные исследования 3 см релятивистской ЛОВ проводились на ускорителе СИНУС-7, обеспечивающем следующие параметры электронного пучка: энергия электронов до 2 MeV, ток пучка до 20 kA, длительность импульса 50 ns. Электродинамическая система ЛОВ была аналогична использовавшейся в [1,2]: средний радиус гофрированного полновода 15 mm, период и амплитуда гофрировки соответственно 16.1 и 2.1 mm, длина замедляющей структуры 113 mm. Отражение рабочей электромагнитной волны ТМ $_{01}$ со стороны катода осуществлялось с помощью запредельного сужения диаметром 23 mm, длиной 40 mm. Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией. Напряженность транспортиру-

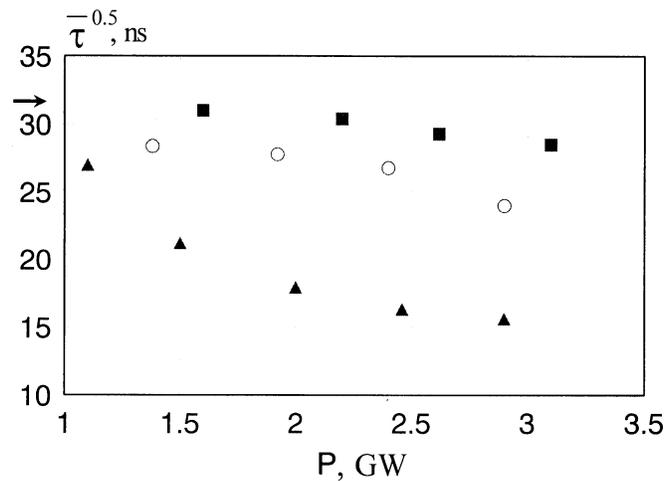


Рис. 2. Длительность микроволновых импульсов ЛОВ (по полувысоте) как функция их мощности при различных вакуумных условиях и обработке электродинамической системы. Треугольники — масляный вакуум, электрохимическая полировка. Окружности — безмасляный вакуум, электрохимическая полировка. Квадраты — безмасляный вакуум, обработка НСЭП. Стрелка — спад импульса рабочего электронного пучка.

ющего магнитного поля до 4 Т. Электроны эмитировались с кромочного взрывоэмиссионного графитового катода диаметром 19 мм. Вывод излучения в атмосферу осуществлялся с помощью рупорной антенны с диаметром апертуры 50 см. Микроволновое окно было изготовлено из оргстекла толщиной 8 мм.

Мощность генерации ЛОВ могла варьироваться путем изменения напряженности транспортирующего магнитного поля либо мощности электронного пучка. На рис. 2 приведены зависимости длительности микроволновых импульсов от мощности излучения для различных вакуумных условий (масляной либо безмасляной вакуумной откачки) и состояния поверхности электродинамической системы ЛОВ (обработанной либо не обработанной НСЭП). Видно, что состояние поверхности электродинамической системы существенно влияет на длительность микроволновых импульсов. Так, при наличии на поверхности

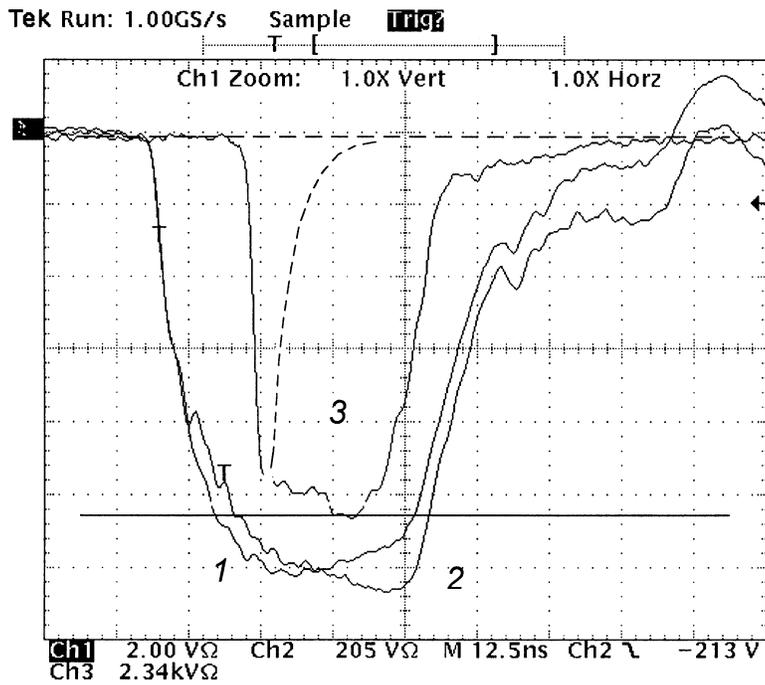


Рис. 3. Осциллограммы импульса напряжения в диоде (1), тока пучка (2) и микроволновой мощности (3) релятивистской ЛОВ. Штриховая линия — осциллограмма микроволновой мощности до обработки электродинамической системы.

электродинамической ЛОВ масляной пленки (при масляной вакуумной откачке) ограничение длительности импульсов наблюдалось уже при уровне мощности излучения ~ 1 GW. После обработки поверхности электродинамической системы НСЭП в условиях безмасляной вакуумной откачки ограничения длительности микроволновых импульсов при мощности излучения до 3 GW не наблюдалось (рис. 3). При этом, как показывают оценки, максимальная напряженность электрического поля на поверхности замедляющей системы и запредельном сужении достигала 1.8 MV/cm.

Как и в [3], в данных экспериментах наблюдался эффект "тренировки" поверхности электродинамической системы ЛОВ интенсивными СВЧ полями. Длительность первых импульсов достигала 20 ns (что больше, чем в [1,2]). Затем в течение 15–20 импульсов, произведенных без развакуумирования системы, длительность импульсов возрастала до 29 ns (рис. 3). В течение следующих 200 импульсов заметных изменений в длительности импульса не наблюдалось, среднеквадратичный разброс длительности не превышал 5%. Энергия в микроволновом импульсе, измеренная калориметром, достигала 90 J.

Следует отметить, что на поверхности электродинамической системы ЛОВ в местах с максимальной напряженностью электрического поля (вблизи запредельного сужения и первой гофры) наблюдалась эрозия, однако число кратеров на единицу поверхности было в 2–3 раза меньше, чем при отсутствии обработки поверхности НСЭП.

Таким образом, использование обработки поверхности электродинамической системы 3 см релятивистской ЛОВ с помощью НСЭП и безмасляной вакуумной откачки позволило увеличить длительность микроволновых импульсов до ~ 30 ns при помощи излучения 3 GW. При этом самопроизвольного ограничения длительности микроволновых импульсов не наблюдалось.

Полученные результаты явились дополнительным подтверждением гипотезы о взрывоэмиссионной природе самопроизвольного ограничения длительности наносекундных импульсов сверхмощных микроволновых генераторов.

Работа выполнена при поддержке Европейского агентства по аэрокосмическим исследованиям (EOARD), контракт F61775–98–WE080.

Список литературы

- [1] Гунин А.В., Кицанов С.А., Климов А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 84–88.
- [2] Gunin A.V., Klimov A.I., Korovin S.D. et al. // IEEE Plasma Science. 1998. V. 26. N 3. P. 326–331.
- [3] Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V. et al. // Proc. Int. University Conf. "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies" (UHF-99). St. Petersburg, May 24–28, 1999. P. 229–232.
- [4] Latham R.V. High Voltage Vacuum Insulation. London: Academic Press, 1981.

- [5] *Mesyats G.A., Proskurovsky D.I.* Pulsed Electrical Discharge in Vacuum. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [6] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.
- [7] *Batrkov A.V., Markov A.B., Ozur G.E.* et al. // IEEE Trans. Diel. and Electr. Insul. 1995. V. 2. P. 237–242.
- [8] *Batrkov A.V., Nazarov D.S., Ozur G.E.* et al. // IEEE Trans. Diel. and Electr. Insul. 1997. V. 4. N 6. P. 857–862.
- [9] *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Назаров Д.С., Карлик К.В.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 10. С. 42–46.
- [10] *Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Изв. вузов. Физика. 1994. № 3. С. 100–114.