

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  $\sim 6$  до  $\sim 30$  ns при мощности излучения 3 GW.

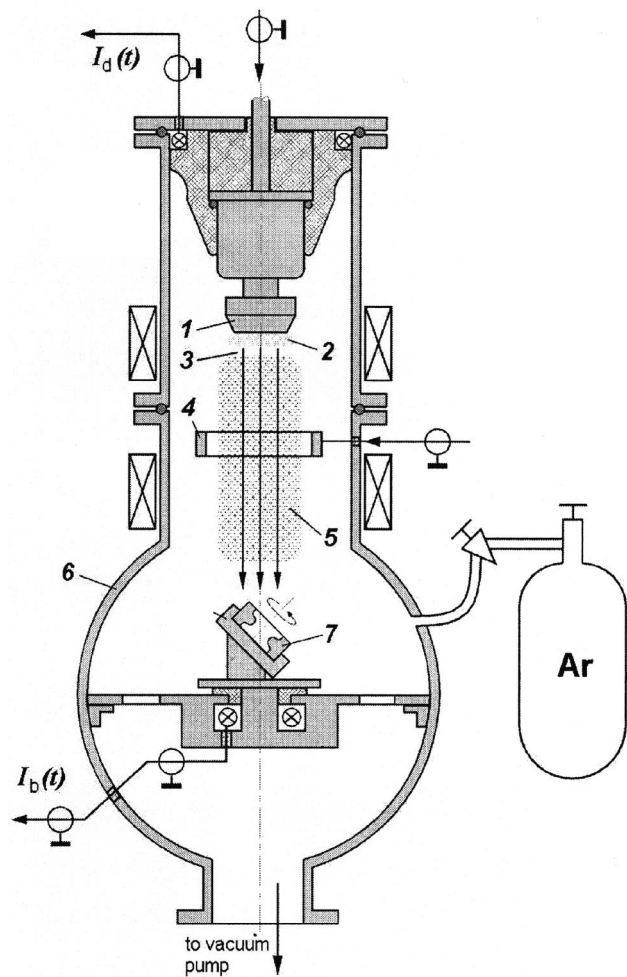
В первых экспериментах с релятивистской лампой обратной волны (ЛОВ) с импульсной мощностью 3 GW наблюдалось самопроизвольное ограничение длительности микроволнового импульса на уровне 6 ns [1,2]. Исследования показали, что укорочение импульса вызвано появлением на поверхности замедляющей структуры взрывоэмиссионных 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  $\mu\text{s}$ , плотность энергии в пучке 2–20  $\text{J/cm}^2$ , 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  $\sim 10^{-5}$  Торр, при этом высоковакуум-

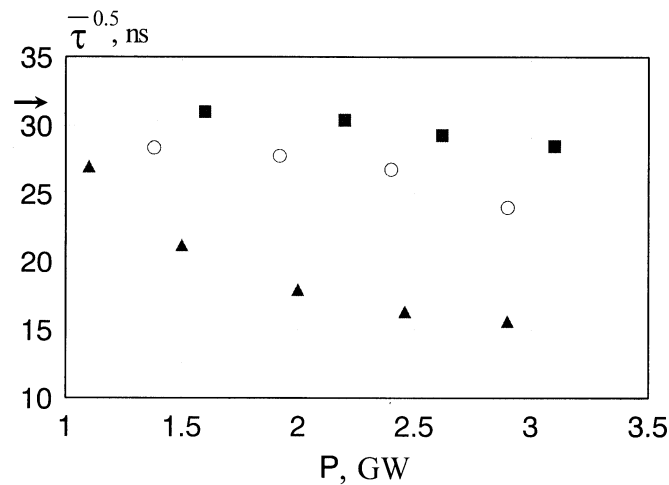


**Рис. 1.** Схема облучения деталей электродинамической системы ЛОВ: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — катодная плазма, 3 — двойной электрический слой, 4 — анод пеннинговской ячейки, 5 — газоразрядная анодная плазма, 6 — вакуумная камера, 7 — облучаемая деталь в манипуляторе.

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  $\mu$ 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  $(1-5) \cdot 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>. Через  $\sim 20$   $\mu$ 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<sup>2</sup> (испарение поверхностного слоя толщиной  $\sim 0.4$   $\mu$ m и плавление на глубину до  $\sim 4$   $\mu$ m) и 5–6 J/cm<sup>2</sup> (плавление на глубину до  $\sim 0.3$   $\mu$ 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.

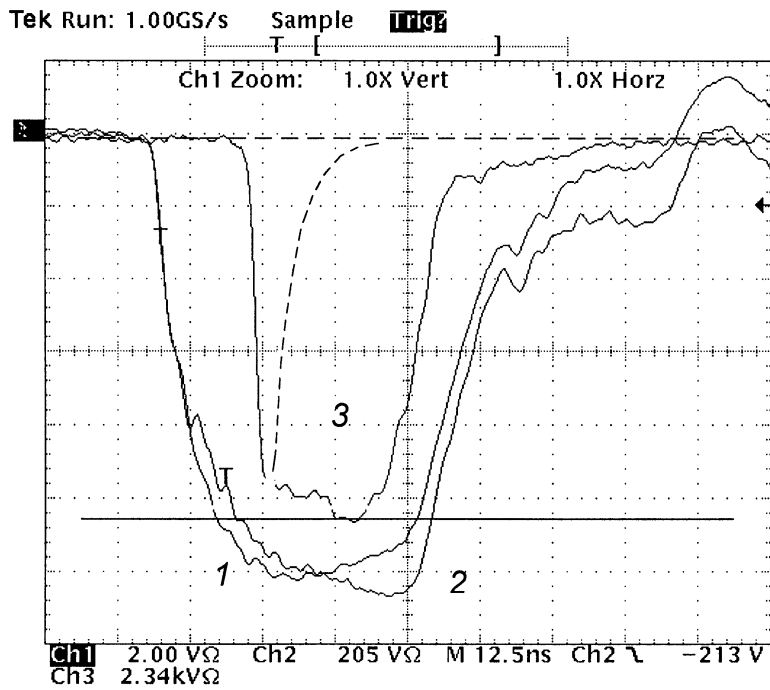
Экспериментальные исследования 3 см релятивистской ЛОВ проводились на ускорителе СИНУС-7, обеспечивающем следующие параметры электронного пучка: энергия электронов до 2 MeV, ток пучка до 20 kA, длительность импульса 50 ns. Электродинамическая система ЛОВ была аналогична использовавшейся в [1,2]: средний 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<sub>01</sub> 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  $\sim 1$  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  $\sim 30$  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.