

09;10

Релятивистская лампа обратной волны диапазона 38 GHz на основе модулятора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока

© С.К. Любутин, Г.А. Месяц, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский,
В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин

Институт электрофизики РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 15 января 1999 г.

Представлены результаты исследования релятивистской ЛОВ диапазона 38 GHz с выходной мощностью до 40 MW. В экспериментах впервые использован инжектор электронного пучка, основанный на 5-наносекундном сильноточном импульсно-периодическом модуляторе с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока.

1. С начала 80-х годов работы по совершенствованию наносекундных сильноточных электронных ускорителей (СЭУ) [1] позволили создать релятивистские СВЧ-генераторы импульсно-периодического действия. Среди них наиболее мощными являются релятивистские лампы обратной волны (ЛОВ) миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн [2–4]. Режим работы этих приборов с частотой повторения до сотен герц стал доступен, когда для высоковольтных генераторов на основе формирующих линий были разработаны эффективные зарядные устройства [5] и найдены условия стабильной работы газовых разрядников [6].

С появлением высоковольтных сильноточных полупроводниковых прерывателей тока [7] возникла принципиальная возможность создания мощных наносекундных модуляторов с индуктивным накопителем энергии, обеспечивающих периодический режим работы ускорителя с частотой повторения более 1 kHz при высокой амплитудной стабильности. Обнаружение эффекта субнаносекундного обрыва тока в SOS-диодах [8] и новые схемотехнические решения позволили в последнее время получить на 150–200-омных резистивных нагрузках пиковые

мощности в 300–500 MW при длительности импульсов 5–6 ns. Эти параметры близки к достигнутым для малогабаритных генераторов с формирующими линиями и искровыми разрядниками [1,4]. Импульсы напряжения с амплитудой ~ 250 kV уже вполне пригодны для генерирования электронного пучка, необходимого для возбуждения релятивистской ЛОВ диапазона 38 GHz. Цель настоящей работы заключалась в экспериментальной проверке такой возможности и определении особенностей работы модулятора с полупроводниковым прерывателем тока и нагрузкой в виде коаксиального диода с магнитной изоляцией (КДМИ).

2. Экспериментальная установка (рис. 1) включала высоковольтный модулятор с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем, КДМИ с графитовым взрывоэмиссионным катодом, электродинамическую замедляющую систему ЛОВ в виде круглого гофрированного волновода, обеспечивающую синхронизм электронов с энергией ~ 250 keV с первой обратной пространственной гармоникой волны E_{01} . Выход замедляющей системы соединялся с коническим излучающим рупором. Рабочий вакуум в системе составлял 10^{-2} Торр.

Для формирования и транспортировки трубчатого электронного пучка диаметром 5.5 mm с током ~ 1 kA графитовый катод располагался в продольном магнитном поле, создаваемом импульсным соленоидом. В режиме одиночных импульсов обеспечивалась напряженность поля 50 кОе. При частотах повторения до 15 Hz напряженность достигала 15 кОе, а повторно-кратковременный режим работы лимитировался конструкцией соленоида, не имевшего принудительного охлаждения.

В экспериментах контролировались ток накачки полупроводникового прерывателя и напряжение на нагрузке. Ток электронного пучка измерялся цилиндром Фарадея, который в этом случае устанавливался в дрейфовую камеру вместо замедляющей системы. Пиковая мощность СВЧ-импульса измерялась сканированием диаграммы направленности кремниевым детектором на горячих носителях. Все измерительные устройства были откалиброваны и имели времена переходных процессов от 1.5 ns (детектор СВЧ) до 150 ps (датчик тока пучка). Конфигурация КДМИ (рис. 1) отличалась малыми размерами. Радиальный зазор между катодным электродом и анодом составлял 4 mm, аксиальный зазор (торец катода–анодное сужение) был равен 10 mm. Цилиндр Фарадея устанавливался в дрейфовой камере на расстоянии 10 mm от входа.

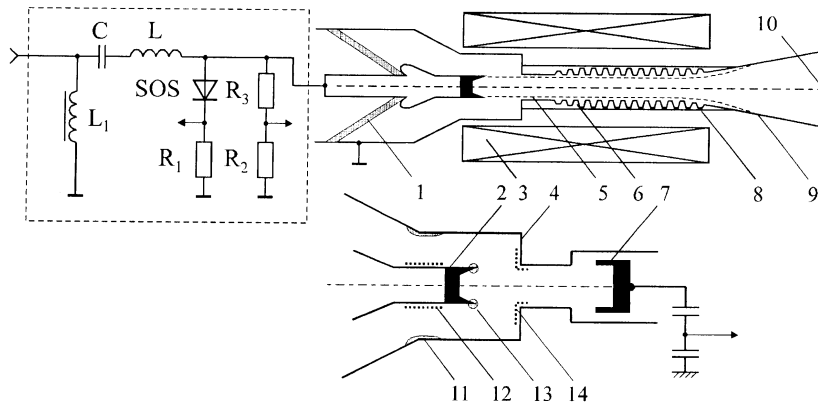


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: C — емкостной накопитель; L — индуктивный накопитель; L_1 — насыщающийся дроссель; SOS — полупроводниковый прерыватель; R_1 – R_3 — токовый шунт и резистивный делитель; 1 — изолятор; 2 — катод; 3 — соленоид; 4 — анод; 5 — электронный пучок; 6 — замедляющая система; 7 — цилиндр Фарадея; 8 — вакуумная дрейфовая камера; 9 — рупорная антенна; 10 — вакуумное СВЧ-окно; 11–14 — зоны катодно-анодных эмиссионных процессов.

3. Отсутствие искровых разрядников с их характерными недостатками — принципиальная особенность экспериментальной установки. При этом высоковольтный контур модулятора оказывается гальванически связанным с катодом КДМИ. Поэтому коммутационный процесс насыщающегося магнитного ключа в предпоследнем звене сжатия энергии еще за ~ 200 ns до обрыва тока в прерывателе приводит к появлению на нагрузке отрицательного предымпульса амплитудой 20 kV и длительностью 70 ns (рис. 2, *a*). В свою очередь, конечное сопротивление полупроводникового прерывателя на стадии прямой токовой накачки определяет возникновение на катодном электроде КДМИ положительного предымпульса (~ 40 ns, 15 kV), а на стадии обратной накачки и до момента обрыва тока генерируется приблизительно такой же по амплитуде отрицательный предымпульс длительностью ~ 20 ns (рис. 2, *c*). Таким образом, предымпульсы в принципе обусловлены схемным решением последнего каскада сжатия энергии. Это важное

отличие модулятора с индуктивным накопителем и полупроводниковым прерывателем от систем с формирующими линиями и разрядниками.

4. Ранее в работе [9] было показано, что даже при длительности 1–2 ns и амплитуде $\sim 10\text{--}15\text{ kV}$ отрицательный предымпульс, непосредственно предшествующий ускоряющему импульсу, играет существенную роль в инициировании электронной эмиссии на катоде. Поэтому в настоящих экспериментах наличие разнополярных предымпульсов определило особенности работы электронного диода и собственно СВЧ-генератора.

Картина развития эмиссионных процессов в КДМИ определялась по совокупности осциллограмм тока накачки и напряжения на прерывателе, тока пучка и эрозионным следам на электродах. При этом был отмечен ряд специфических режимов работы КДМИ. В случае, когда интенсивная эмиссия электронов развивалась с катода на предымпульсе 1 (рис. 2, *b*), интервал времени в 200 ns оказывался достаточным для расширения катодной плазмы из области 13 (рис. 1) в осевом и радиальном направлениях. Под воздействием электронов на торце анода 4 (рис. 1) возникала коллекторная плазма (эрозионные следы в области 14, рис. 1). При скоростях разлета катодно-коллекторной плазмы в радиальном и аксиальном направлениях $\sim 10^6$ и $\sim 10^7\text{ cm/s}$ соответственно [10] электронный диод практически полностью шунтировал прерыватель. В этом случае (рис. 2, *b*) выходное напряжение резко падало, а цилиндр Фарадея фиксировал как электронный ток с катода $\sim 10\text{--}20\text{ A}$ (импульсы 2, рис. 2, *b*), так и положительный всплеск тока $\sim 100\text{ A}$, возникающий при попадании плазмы на датчик (импульс 3, рис. 2, *b*). Плазма могла приходиться как с катода, так и с коллектора, т.е. из областей 13 и 14 (рис. 1). Следует отметить, что представленная на рис. 2, *b* картина наблюдалась достаточно редко. Это говорит о пороговом, случайном характере инициирования электронной эмиссии за время предымпульса.

В обычном режиме ток накачки прерывателя и ускоряющий импульс напряжения на КДМИ представлены на рис. 2, *c*. Такой режим достигался после тренировки электродов КДМИ, для чего требовалось от нескольких десятков до сотен импульсов. В процессе тренировки время от времени наблюдалось частичное шунтирование прерывателя, что было связано с развитием электронной эмиссии с анодного электрода на положительном предымпульсе 4 (рис. 2, *c*). Зона эмиссии 11 (рис. 1) имела выраженную эрозию, а противоположная поверхность 12 (рис. 1) — следы "обработки" электронным пучком. При развитии этих процессов

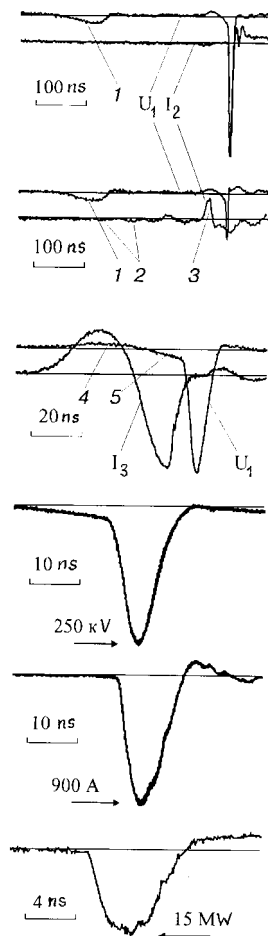


Рис. 2. Осциллограммы: *a* — напряжение на вакуумном диоде (U_1) и ток пучка (I_2) в режиме без шунтирования прерывателя; *b* — те же сигналы в режиме шунтирования прерывателя; *c* — ток накачки прерывателя (I_3) и напряжение на вакуумном диоде в штатном режиме работы модулятора; *d*, *e* — напряжение на вакуумном диоде и ток пучка, регистрируемые в режиме накопления 20 импульсов; *f* — СВЧ-импульс, регистрируемый в стробоскопическом режиме накопления 100 импульсов. 1–5 — предимпульсы.

ускоряющий импульс снижался по амплитуде на 20–30%. По мере тренировки электродов количество сбоев уменьшалось, а импульс ускоряющего напряжения (рис. 2, *d*) и импульс пучка (рис. 2, *e*) становились достаточно стабильными. Отметим, что две последние осциллограммы получены по нескольким десяткам импульсов цифровым осциллографом Tek-TDS684B в режиме накопления "envelop". При достигнутой стабильности ускоряющего напряжения и тока пучка СВЧ-импульсы регистрировались на частоте 10–15 Hz в стробоскопическом режиме с накоплением по 40–100 импульсам (рис. 2, *f*). В режиме однократных импульсов с продольным магнитным полем 50 кОе пиковая мощность СВЧ-излучения составила ~ 40 MW, в режиме с частотой повторения — 15–20 MW. Максимальный электронный к.п.д. СВЧ-генератора был на уровне 10–15%.

5. Таким образом, создана экспериментальная установка, которая впервые объединила сильноточный СВЧ-прибор с электронным диодом на основе взрывоэмиссионного катода и модулятор с индуктивным накопителем и полупроводниковым прерывателем тока. Показано, что стабильность генерации СВЧ-излучения в такой системе в значительной мере определяется влиянием набора опережающих разнополярных предимпульсов на работу электронного диода. Предполагается, что оптимизация конфигурации диода, тренировка поверхностей электродов, улучшение вакуумных условий и применение постоянного магнитного поля (сверхпроводящий соленоид или постоянный магнит) позволяет обеспечить работу СВЧ-генератора с частотой повторения более 1 kHz.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А. // Релятивистская высокочастотная электроника. В. 4. Горький: ИПФ СССР, 1984. С. 192–216.
- [2] Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 4. С. 232–235.
- [3] Белоусов В.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. В. 10. С. 453–457.
- [4] Yalandin M.I. et al. // Proc. of IX IEEE Intern. Pulsed Power Conference. - Albuquerque, NM, USA. 1993. P. 388–391.
- [5] Ельчанинов А.С. и др. // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Сб. статей под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука. 1983. С. 5–21.
- [6] Ельчанинов А.С. и др. // ПТЭ. 1979. № 4. С. 162–164.

- [7] *Lyubutin S.K.* et al. // Proc. of XI IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Baltimore, MA, USA. 1997. V. 2. P. 992–998.
- [8] *Любу́тин С.К.* и др. // ДАН. 1998. Т. 360. № 4. С. 477–479.
- [9] *Yalandin M.I.* et al. // Proc. of XVII Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Berkeley, CA, USA. 1996. V. 2. P. 635–639.
- [10] *Бугаев С.П.* и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ СССР, 1979. С. 5–75.