

09;10

Резонансная релятивистская лампа обратной волны дециметрового диапазона на основе субмикросекундного высоковольтного генератора

© С.Н. Волков, К.В. Карлик, Б.М. Ковальчук, И.К. Куркан,
Г.Е. Озур, И.В. Пегель, С.Д. Полевин,
Д.И. Проскуровский, М.Ю. Сухов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: polevin@ife.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 9 ноября 2007 г.

Представлены результаты исследований резонансной релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ) дециметрового диапазона с использованием субмикросекундного высоковольтного генератора, выполненного на основе генератора Маркса с водяной формирующей линией. Показано, что самопроизвольное ограничение длительности микроволновых импульсов в ЛОВ обусловлено эмиссией заряженных частиц из плазмы, возникающей на поверхности замедляющей структуры под действием интенсивных высокочастотных полей. Повышение электрической прочности электродинамической системы резонансной ЛОВ посредством обработки ее поверхности низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком позволило увеличить энергию в импульсе до 250 J при мощности излучения около 3 GW.

PACS: 84.40.Fe

Улучшение продольного распределения высокочастотного поля в резонансной релятивистской ЛОВ [1] посредством отражения рабочей волны TM_{01} от концов электродинамической системы и обеспечение оптимальных условий взаимодействия электронного пучка со встречной и попутной волнами позволяют увеличить эффективность генерации до 30% и существенно (в 2–3 раза) уменьшить длину прибора. В экспериментах с резонансной ЛОВ на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 [2] (энергия электронов до 2 MeV, ток пучка до 20 kA, длительность импульсов 50 ns) было получено одномодовое излучение с пиковой мощностью 5.3 GW при эффективности около

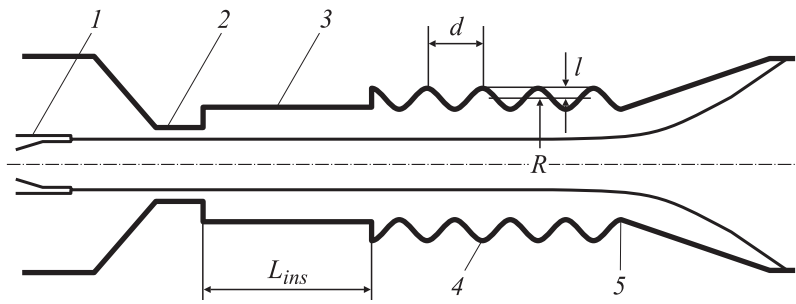


Рис. 1. Схема резонансной релятивистской ЛОВ: 1 — катод, 2 — запердельное сужение, 3 — вставка, 4 — замедляющая система, 5 — выходной рефлектор.

30%. Длительность микроволнового импульса составляла 20 ns и была ограничена длительностью импульса тока. В данной работе представлены результаты дальнейших исследований резонансной релятивистской ЛОВ с использованием субмикросекундного высоковольтного генератора. Основной целью данных исследований являлось увеличение длительности и энергии микроволновых импульсов, а также получение количественных и качественных данных о механизме срыва генерации.

Схема резонансной релятивистской ЛОВ представлена на рис. 1. Электронный пучок формируется в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией и транспортируется в замедляющую структуру (ЗС) через запердельное сужение, необходимое для отражения встречной электромагнитной волны. Частичное отражение рабочей волны со стороны коллекторного конца ЗС обеспечивается за счет уменьшения ее среднего радиуса и позволяет варьировать добротность (Q) электродинамической системы. Отрезок гладкого цилиндрического волновода между запердельным сужением и началом замедляющей структуры служит для подстройки оптимального сдвига фазы между основной гармоникой попутной и (-1-й) гармоникой встречной электромагнитных волн. Отношение амплитуд гармоник на траектории электронного пучка задается глубиной гофрировки ЗС. Генератор оптимизировался численно с использованием РИС-кода КАРАТ [3]. Моделирование показало, что при оптимальной геометрии электродинамической системы ($l \approx \lambda/8$, $R \approx \lambda/2$, $L_{sws} \approx 2.5\lambda$, $L_{ins} \approx \lambda$, $Q \approx 100$, где L_{sws} и L_{ins} — длины ЗС и вставки соответственно, λ — длина волны излучения) КПД

по мощности составляет около 30% и изменяется незначительно в широком диапазоне мощностей электронного пучка (от 5 до 20 GW). Оптимальный импеданс вакуумного диода $\sim 100 \Omega$, время нарастания микроволновых колебаний ~ 20 ns.

Эксперименты проводились с использованием высоковольтного генератора СТЕНД [4], выполненного на основе генератора Маркса с водяной формирующей линией. Длительность импульса могла варьироваться в диапазоне 100–300 ns. Поскольку в экспериментах импеданс вакуумного диода существенно превышал импеданс формирующей линии, высоковольтный генератор работал как „источник напряжения“, обеспечивая достаточно стабильное напряжение на диоде в течение импульса. Для формирования сильноточного электронного пучка использовался взрывоэмиссионный цилиндрический графитовый катод диаметром 5 см и толщиной кромки 0.7 mm. Электродинамическая система ЛОВ была изготовлена из нержавеющей стали марки 12X18H10T. После механической обработки поверхность электродинамической системы электрополировалась в ортофосфорной кислоте. В экспериментах вакуумный диод откачивался с помощью турбомолекулярного насоса до уровня 10^{-5} Torr. Микроволновое излучение выводилось в атмосферу с помощью рупорной антенны с диаметром выходного окна $\sim 8\lambda$. Окно было изготовлено из полиэтилена толщиной $\approx \lambda_w$, где λ_w — длина волны излучения в полиэтилене. Измерение выходной мощности излучения производилось с помощью калиброванных дипольных антенн суммированием по диаграмме направленности, а также встроенного в выходной тракт генератора ответвителя с коэффициентом 60 dB. Энергия в микроволновом импульсе измерялась с использованием широкоапертурного калориметра.

В экспериментах генератор настраивался на максимум выходной мощности и энергии в импульсе варьированием импеданса вакуумного диода и места выпадения электронного пучка. Для предотвращения влияния расширения катодной плазмы зазор между катодом и анодным сужением был выбран достаточно большим ($d_{a-c} \approx 6$ cm), так что $(d_{a-c} + L_{cutof}) > V_p \tau_b$, где L_{cutof} — длина запердельного сужения, τ_b — длительность импульса тока пучка и $V_p \approx (0.6 - 2) \cdot 10^7$ cm/s — скорость расширения катодной плазмы вдоль магнитного поля [5]. Импеданс вакуумного диода в этом случае мог варьироваться изменением диаметра анода. В оптимальном режиме (при напряжении на катоде ~ 1 MV, токе в диоде ≈ 12 kA) пиковая мощность излучения

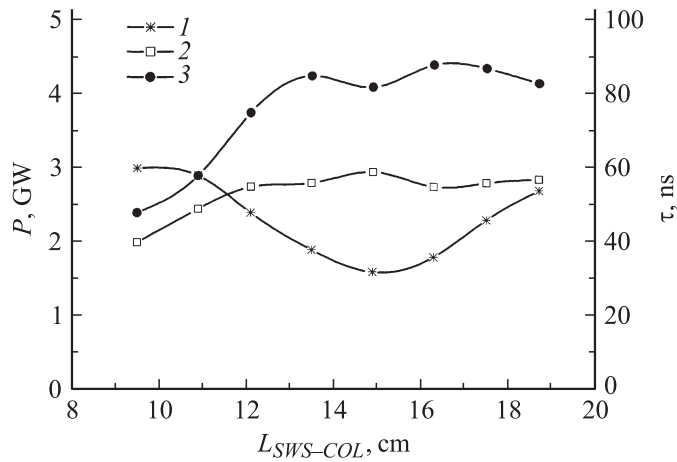


Рис. 2. Зависимости мощности P и длительности микроволновых импульсов от расстояния между концом ЗС и местом выпадения электронного пучка для электрополированной 2 и обработанной НСЭП 3 электродинамической системы.

составляла около 3 GW при КПД 25–30%. Частота генерации (3.6 GHz) оставалась постоянной в течение импульса. Зависимость мощности излучения от места выпадения электронного пучка (рис. 2) имела осциллирующий характер, обусловленный влиянием взаимодействия электронов с основной гармоникой попутной волны [6]. Длительность микроволновых импульсов ЛОВ с электрополированной ЗС была ограничена на уровне 50–60 ns, и энергия в импульсе в этом случае составляла 150–180 J. Длительность импульсов существенно падала при уменьшении расстояния между концом ЗС и местом выпадения пучка менее 10–12 cm, что могло быть связано с влиянием расширения коллекторной плазмы вдоль силовых линий магнитного поля [7].

Как было показано ранее [8], ограничение длительности микроволновых импульсов в наносекундной релятивистской ЛОВ гигаваттного уровня мощности может быть обусловлено развитием взрывной эмиссии на поверхности ЗС под действием интенсивных ВЧ-полей и поглощением рабочей электромагнитной волны электронами, движущимися между гофрами электродинамической системы. Ключевую роль в подавлении микроволновой генерации играют эмитированные из

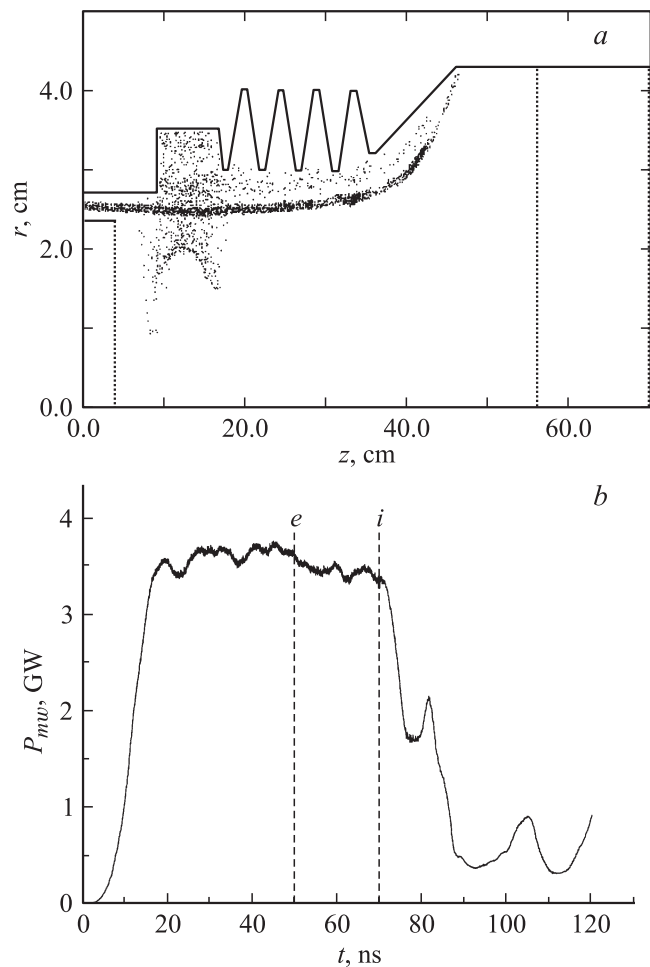


Рис. 3. Расчетная конфигурация резонансной ЛОВ (*a*) и зависимость мощности излучения от времени (*b*). Начало эмиссии частиц с поверхности ЗС: электронов на $t = 50$ ns, протонов на $t = 70$ ns.

поверхностной плазмы положительные ионы, которые снимают ограничение по пространственному заряду на эмиссионный ток электронов. Таким образом, длительность микроволнового импульса ограничена

суммарным временем развития взрывной эмиссии и накопления ионов в объеме ЗС. На рис. 3 представлены результаты численного моделирования с использованием PIC-кода KARAT резонансной ЛОВ с эмиссией частиц с поверхности ЗС. Параметры микроволнового генератора, использованные в моделировании, были близки к экспериментальным. Эмиссия электронов и ионов (протонов) включалась отдельно по времени для демонстрации существенного влияния ионов на процесс подавления генерации. Моделирование показало, что процесс генерации наиболее сильно нарушается при эмиссии частиц с поверхности электродинамической системы в области между запредельным сужением и началом ЗС. Как показывают оценки, при мощности излучения 3 GW напряженность высокочастотного электрического поля на поверхности электродинамической системы вблизи запредельного сужения и начала ЗС составляет $\sim 1 \text{ MV/cm}$.

Следуя взрывоэмиссионной гипотезе срыва генерации, задача увеличения длительности микроволновых импульсов 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. В ИСЭ СО РАН был предложен новый метод повышения электрической прочности вакуумной изоляции путем обработки поверхности электродов низкоэнергетическим сильноточечным электронным пучком (НСЭП) микросекундной длительности [9,10]. Высокая плотность энергии ($\sim 10 \text{ J/cm}^2$) и малая длительность импульса электронного пучка обеспечивают обработку поверхности в режимах как плавления, так и частичного испарения. Эффективно удаляя из его поверхностного слоя диэлектрические включения, примеси и газы и сглаживания поверхность металла, такая обработка подавляет развитие взрывной электронной эмиссии.

В экспериментах с обработанной НСЭП электродинамической системой в сравнении с электрополированной наблюдалось увеличение длительности микроволновых импульсов (рис. 2). Как и ранее [8], в данных экспериментах наблюдался эффект „тренировки“ электродинамической системы ЛОВ в интенсивных ВЧ-полях. Длительность первых импульсов составляла 70–75 ns при мощности излучения 3 GW; затем в течение последующих 5–10 импульсов (сделанных без развакуумирования системы) длительность возрастала до 90 ns и стабилизировалась. Среднеквадратичный разброс длительности от импульса к импульсу не превышал 10%. Энергия в импульсе, измеренная калориметром,

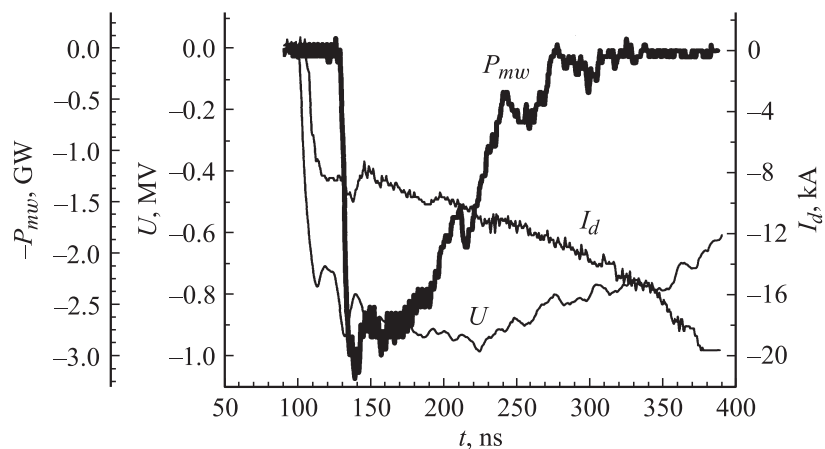


Рис. 4. Типичные формы импульсов напряжения на катоде, тока в диоде и микроволновой мощности (для обработанной НСЭП электродинамической системы).

составляла около 250 J. Типичные формы импульсов напряжения на катоде, тока в диоде и микроволновой мощности представлены на рис. 4.

Таким образом, использование с помощью НСЭП обработки поверхности электродинамической системы резонансной релятивистской ЛОВ дециметрового диапазона позволило увеличить энергию в микроволновом импульсе до 250 J при мощности излучения около 3 GW. Этот результат еще раз подтверждает гипотезу о взрывоэмиссионной природе самопроизвольного ограничения длительности импульсов в мощных наносекундных СВЧ-приборах.

Список литературы

- [1] *Кицанов С.А., Коровин С.Д., Куркан И.К. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 87–94.*
- [2] *Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 12. С. 21–30.*
- [3] *Tarakanov V.P. User Manual for Code KARAT. Springfield, VA: BRA, 1992. 176 с.*

- [4] Воробьюшко М.И., Ковальчук Б.М., Кокишенев В.А. и др. // Труды 1-й конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Л., 1977. Т. 3. С. 160–163.
- [5] Бугаев С.П., Ильин В.П., Кошелев В.И. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. С. 5–75.
- [6] Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 1. С. 12–16.
- [7] Benford J., Benford G. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 26. P. 311–317.
- [8] Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. T. 28. P. 485–495.
- [9] Batrakov A.V., Markov A.B., Ozur G.E. et al. // IEEE Trans. Diel. and Electr. Insul. 1997. T. 4. P. 857–862.
- [10] Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Назаров Д.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 10. В. 23. С. 42–46.