

12;13

## Мощная релятивистская лампа обратной волны с продольно-щелевой электродинамической системой

© М.Б. Гойхман, В.В. Кладухин, С.В. Кладухин, Н.Ф. Ковалев,  
Н.Г. Колганов, С.П. Храмцов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: kovalev@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 12 сентября 2013 г.

Показано, что продольные щели в электродинамической системе релятивистской лампы обратной волны можно использовать в качестве дополнительного средства селекции мод и одновременно в качестве эффективного абсорбера пристеночной плазмы. С этими свойствами связаны возможности повышения предельных длительности импульсов выходного излучения и частоты их следования.

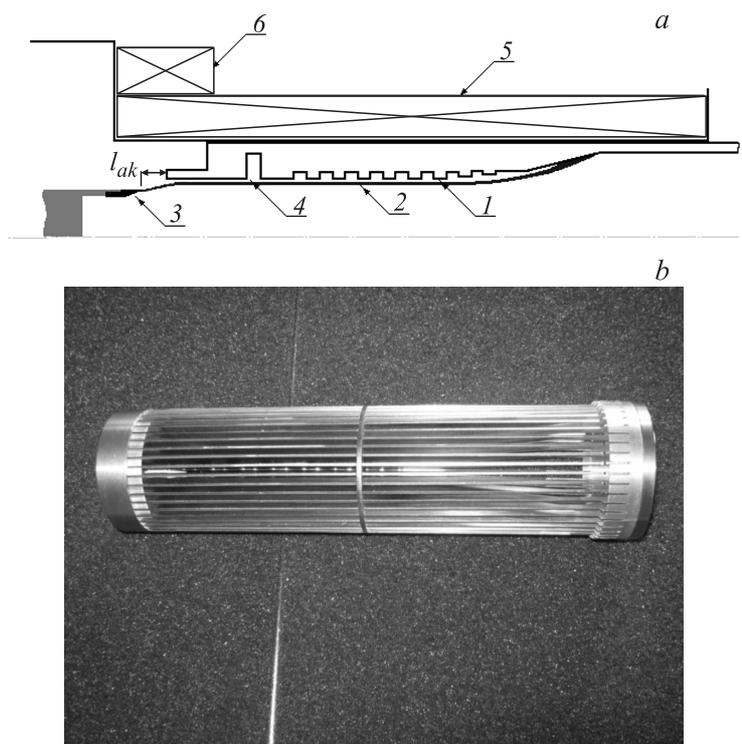
В экспериментах с релятивистской лампой обратной волны (ЛОВ), использующей взрывоэмиссионные электронные пучки наносекундной длительности, достигнуты мощности пространственно-когерентного выходного излучения, превышающие 1 GW во всем сантиметровом диапазоне длин волн [1–3]. Последующие исследования этого типа генераторов были в основном направлены на выяснение возможностей как различных вариантов ЛОВ, так и отдельных их узлов и подсистем [4]. Несмотря на прикладную направленность подобных исследований они часто имеют фундаментальный или общезначимый характер. Так, например, проблемы повышения электропрочности и селективности электродинамических систем имеют явную фундаментальную составляющую. К такому типу относится и рассматриваемая в настоящем сообщении задача проверки работоспособности идеи об использовании замедляющих систем и коллекторов с продольными щелями. Узкие продольные щели в круглой замедляющей системе не изменяют электродинамических свойств осесимметричной волны электрического типа, рассматриваемой здесь в качестве рабочей, а все остальные моды в той

или иной степени подвержены изменениям. Эти фильтрующие свойства удобно использовать для дополнительной селекции мод, причем не только в ЛОВах. Одновременно продольные сквозные щели на стенках могут выполнять функции абсорбера остаточных газов и пристеночной плазмы, что в конечном итоге должно приводить к значительному улучшению электропрочностных характеристик рабочего пространства в генераторах, особенно работающих в режимах с высокой частотой следования импульсов с большой длительностью.

Исследования были проведены на сильноточном ускорителе прямого действия со следующими параметрами ускоряющих импульсов: напряжение в режиме согласования  $\sim 0.5$  MV, ток в режиме согласования  $\sim 7$  kA, длительность импульсов напряжения  $\sim 20$  ns, режим работы однократный.

Конструктивная схема экспериментального макета ЛОВ автогенератора трехсантиметрового диапазона волн показана на рис. 1, *a*. Использовалась магнитно-изолированная пушка с кромочным взрывоэмиссионным катодом из графита. Ведущее магнитное поле ( $H_0$ ) создавалось двумя импульсными соленоидными с независимыми источниками питания, что позволяло путем декомпрессии изменять диаметр тонкостеночного трубчатого пучка в пространстве взаимодействия (от 22 до 27 mm). Подстройка согласования пушки с высоковольтным источником осуществлялась изменением анод-катодного зазора  $l_{ak}$  (рис. 1, *a*). Электродинамическая система и коллектор были выполнены наборными из отдельных пластин (рис. 1, *b*). Резонансный же четвертьволновый рефлектор-модулятор, наоборот, был выполнен сплошным. Размеры электронной пушки, рефлектора, коллектора и гофр были взяты с действующего макета укороченной ЛОВ [3], которая работала на этом же ускорительном комплексе и с той же магнитной системой. Величина ведущего магнитного поля в рабочем пространстве могла оперативно изменяться в пределах от 5 до 30 kOe (рис. 2). Также оперативно можно было изменять и диаметр пучка в рабочем пространстве. Основные параметры электронного пучка измерялись и контролировались следующими средствами: емкостным делителем, поясом Роговского, торцевыми и цилиндрическими контрастными мишенями.

Контролировались также параметры и характеристики выходного излучения повторного электронного пучка, возникающего из-за рассогласования генератора ускоряющего напряжения электронной пушки.

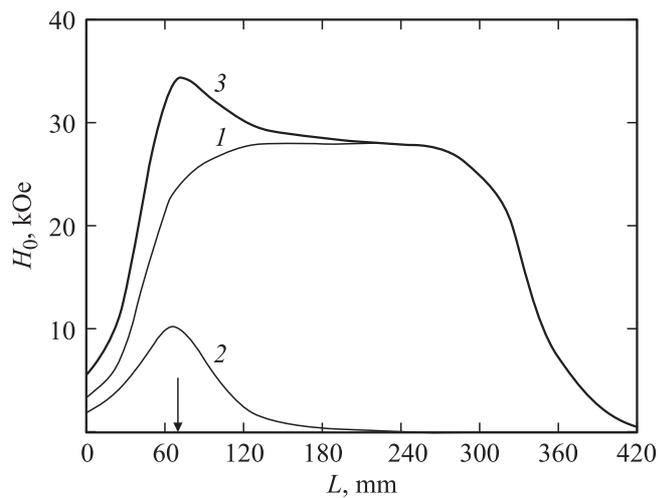


**Рис. 1.** ЛОВ генератора. *a* — конструктивная схема: 1 — гофрированный волновод, 2 — тонкостенный электронный пучок, 3 — кромка катода, 4 — рефлектор-модулятор, 5 — основной соленоид, 6 — дополнительный соленоид; *b* — внешний вид замедляющей структуры.

Из средств высокочастотной диагностики применялись:

- калиброванные детекторы на горячих электронах с синхронизованными источниками питания;
- маломощные точечные детекторы сантиметрового диапазона длин волн с калиброванными аттенюаторами и ответвителями СВЧ;
- торцевой калориметр с батареей низкоомных термопар и с усилителем постоянного тока;

Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 2



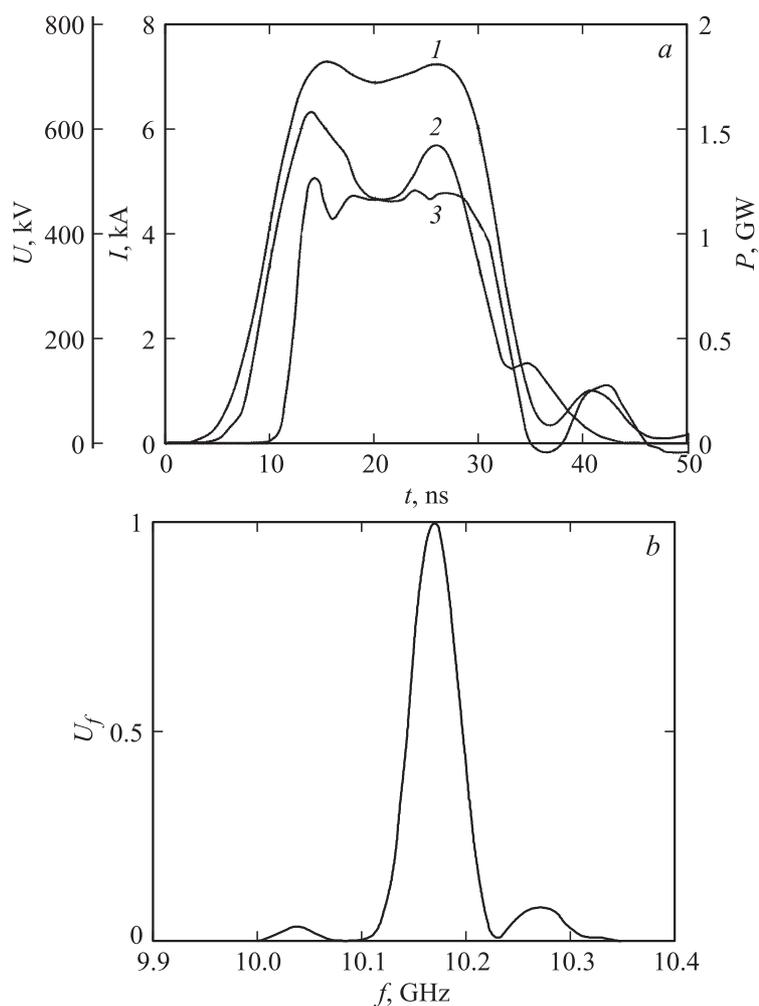
**Рис. 2.** Осьевые распределения величин направляющего магнитного поля: от основного соленоида (1), от дополнительного соленоида (2) и общее (3). Стрелкой показана плоскость установки кромки катода.

— два гетеродина, на перестраиваемом импульсном магнетроне с мощностью 100 kW и на твердотельном генераторе с милливаттной мощностью;

— световое табло для грубых оценок излучаемой мощности, структуры и ширины диаграммы направленности;

— короткофокусное зеркало и средства наблюдения за свечениями, сопровождающими разряды или пробои СВЧ.

На рис. 3, *a* приведены осциллограммы импульсов с емкостного делителя (1), с пояса Роговского (2) и с калиброванного детектора (3), полученные в режиме, близком к оптимальному:  $U \approx 0.5$  MV,  $I \approx 7$  kA,  $H_0 \approx 28$  kOe, диаметр электронного пучка  $\approx 26$  mm. Мощность импульсов выходного излучения достигала 1.2 GW, а их длительность — 16 ns. Амплитудный спектр, соответствующий этому режиму генерации, приведен на рис. 3, *b*, из которого видно, что несущая частота ( $f_0 \approx 10.15$  GHz) оказалась близкой к расчетной, а ширина немного превысила естественную ширину, определяемую длительностью импульсов генерации.



**Рис. 3.** *a* — осциллограммы импульсов: 1 — ток электронного пучка, 2 — ускоряющее напряжение, 3 — огибающая микроволнового излучения; *b* — амплитудный спектр микроволнового излучения; *c* — мощность (1) и длительность (2) импульсов выходного излучения в зависимости от величины направляющего магнитного поля.

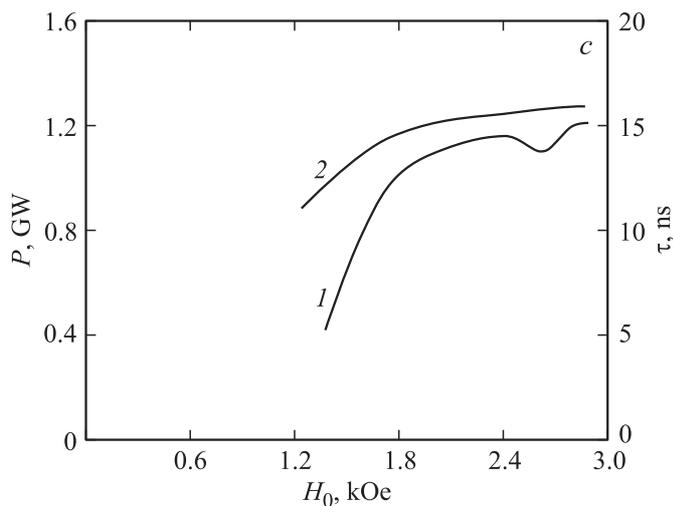


Рис. 3 (продолжение).

Полученные результаты (мощность, частота и ширина линии генерации, длительность импульсов и пространственная структура выходного излучения) практически не отличаются от результатов, полученных в экспериментах с генератором со сплошной электродинамической структурой. Соответственно оказались близкими КПД по мощности ( $\approx 0.3$ ) и по энергии ( $\approx 0.2$ ). Обращает внимание то, что и в исходном, и в щелевом варианте ЛОВ генерация наблюдается в достаточно широких диапазонах изменений тока и напряжения ускоряющих импульсов. Сравнительно узкой оказалась и полоса зоны циклотронного подавления генерации (рис. 3, *c*), что характерно для оптимальных режимов генерации. Последними обстоятельствами также объясняются малые длительности ( $\approx 3$  ns) фронтов огибающих импульсов СВЧ-излучения (рис. 3, *a*) в новом генераторе и его прототипе.

Таким образом, проведенная первая серия экспериментов показала, что продольные щели не ухудшили режимов генерации созданного макета гигаваттной ЛОВ. Никак не проявились и ТЕМ-волны, существующие в многощелевых системах, поскольку их связь с электронным пучком не достигала критического уровня, что подтверждается и модельными

численными расчетами. Как видно, метод, основанный на прорезании узких щелей в электродинамических системах гигаваттных ЛОВ, вполне пригоден для решения задач электропрочности и селекции. Особенно перспективен рассматриваемый метод в сочетании с использованием многоструйных электронных пучков [5], когда число щелей совпадает с числом струй. Это позволит реализовать плавную оперативную регулировку коэффициента связи рабочей волны с электронным пучком и, что особенно ценно, ослабить тепловую и эрозионную нагрузки на коллектор, пропустив каждый парциальный пучок (струю) через отдельную щель.

## Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. // Письма в ЖТФ. 1973. Т. 18. В. 4. С. 232–235.
- [2] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [3] Гойхман М.Б., Громов А.В., Кладухин В.В., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицын А.В., Храмов С.П. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 87–93.
- [4] Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 17–23.
- [5] Гойхман М.Б., Громов А.В., Кладухин В.В., Кладухин С.В., Ковалев Н.Ф., Храмов С.П. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 4. С. 53–58.