

УДК 533.922
EDN: KSWVRP

PACS: 52.59.Ye



Плазменный мазер с магнитной самоизоляцией

А. Б. Булейко, В. П. Бахтин, О. Т. Лоза, А. А. Раваев,
А. Г. Быков, Л. В. Коновальцева

Впервые создан плазменный мазер, работающий по принципу СВЧ-генератора на линии с магнитной самоизоляцией (magnetically insulated transmission line oscillator, MILO). Для получения одиночных импульсов напряжения 550 кВ и длительностью 3 нс использовался генератор с импедансом 33 Ом. Малая длительность импульса определяла режим работы лазера – сверхширокополосное усиление шума в полосе частот от 0,6 до 5 ГГц. Максимальное измеренное электрическое поле волны соответствовало мощности излучения свыше 500 МВт.

Ключевые слова: плазменный мазер, MILO, магнитная самоизоляция, сверхширокополосный (СШП), усиление шума.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-72-77

Введение

Центральной проблемой при создании источников излучения является повышение их эффективности. У приборов релятивистской сильноточной СВЧ-электроники эффективность определяется, в значительной степени, необходимостью создания сильного магнитного поля, ~ 1 Тл и более, для формирования

электронного потока. Существующие в настоящее время криомагниты дороги и весьма требовательны к условиям эксплуатации, в частности, к наличию механических вибраций, а на питание «теплых» соленоидов уходит большая, до 90 % часть общей мощности энергопотребления. Поэтому внимание привлекают устройства, не требующие сильного магнитного поля, а именно, виркаторы [1] и MILO [2].

СВЧ-генератор на линии с магнитной самоизоляцией (magnetically insulated transmission line oscillator, MILO) напоминает по принципу действия классический СВЧ-генератор со скрещенными полями, а именно, лампу обратной волны М-типа. Однако аксиально-симметричный MILO использует скрещенные поля от одного источника высоковольтного импульса: радиальное электрическое поле длинного цилиндрического катода и азимутальное магнитное поле тока, протекающего по этому катоду. Электроны, эмитированные с боковой поверхности катода в скрещенных полях, ускоряются и приобретают аксиальную скорость, после чего излучают часть энергии при взаимодействии с замедляющей структурой. В результате MILO с КПД

Булейко Алла Борисовна^{1,2}, рук. проекта, ст. преп., к.ф.-м.н.

E-mail: buleyko@triniti.ru

Бахтин Виталий Петрович¹, нач. отдела, к.ф.-м.н.

Лоза Олег Тимофеевич^{2,1}, дир. института, профессор, д.ф.-м.н., науч. рук. проекта.

Раваев Александр Александрович¹, в.н.с., д.ф.-м.н.

Быков Александр Геннадьевич¹, вед. инженер.

Коновальцева Людмила Владимировна², доцент, к.ф.-м.н.

¹ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Россия, 108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12.

² Российский университет дружбы народов.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Статья поступила в редакцию 23.11.2022

После доработки 12.12.2022

Принята к публикации 19.12.2022

© Булейко А. Б., Бахтин В. П., Лоза О. Т., Раваев А. А., Быков А. Г., Коновальцева Л. В., 2023

11 % [3] оказывается в целом более эффективным, чем релятивистские сильноточные лампы обратной волны (карсиотроны), магнетроны и клистроны с «электронными» КПД, достигающими 60 %, но требующие сильных магнитных полей соленоидов.

Как и большинство СВЧ-генераторов с замедляющими структурами, МЛО излучает узкую спектральную линию. Для генерации мощного излучения с максимально широким спектром используются сверхширокополосные (СШП) генераторы импульсов. Эти генераторы основаны на разных физических принципах, но все используют один подход, следующий из преобразования Фурье: ширина спектра квазигармонического импульса обратно пропорциональна его длительности. Если импульс содержит несколько периодов колебаний с затухающей амплитудой, как у генераторов на линии с насыщенным ферритом [4], то ширина спектра сравнительно узкая, пара десятков процентов от центральной частоты. Но если импульс короткий, напр., биполярный, и содержит всего один период, то ширина его спектра увеличивается до 200 % от центральной частоты. Недостатки СШП-генераторов непосредственно связаны с принципом их функционирования: на низких частотах до ~ 1 ГГц невозможно сфокусировать излучение компактной антенной для его использования на больших расстояниях, а излучение на высоких частотах, которое удобно фокусировать, напр., до 20 ГГц от «сверхсветовых» источников [5], обладает слишком малой длительностью и, как следствие, малой энергией импульса и заметной дисперсией («расплыванием») при распространении в атмосфере.

Указанных недостатков лишены плазменные мазеры [6] с шириной спектра излучения не меньшим, чем у СШП-генераторов, частотами излучения до десятков ГГц и длительностями импульсов от единиц до сотен наносекунд, которые не связаны с частотой и шириной спектра излучения. В плазменном мазере поток релятивистских электронов усиливает медленные плазменные волны по механизму Черенкова. Если длительность импульса плазменного мазера не превышает нескольких наносекунд, он работает в режиме усилителя шума. В таком режиме работы в

шумоподобном спектре излучения отсутствуют яркие линии частот продольных мод плазменного резонатора. Плазменный мазер [7] в режиме усилителя шума с рабочим диапазоном частот от 3 до 25 ГГц продемонстрировал в эксперименте при мощности свыше 100 МВт «электронную» эффективность по энергии импульса излучения свыше 25 % относительно энергии импульса электронного пучка. Понятно, что при учете энергии для создания сильного магнитного поля соленоида, необходимого для формирования электронного пучка, энергетическая эффективность устройства была на порядок ниже.

Тем не менее, магнитная самоизоляция, применяемая в МЛО, оказалась применимой и для плазменных мазеров. В численном эксперименте [8] было продемонстрировано, что широкополосный плазменный мазер с магнитной самоизоляцией в режиме усилителя шума может достигать эффективности 8 % по энергии импульса на гигаваттном уровне мощности в диапазоне частот до 15 ГГц.

Целью настоящей работы была экспериментальная проверка возможности создания плазменного мазера с магнитной самоизоляцией – источника мощного СШП излучения без сильного магнитного поля соленоида и с частотами излучения, не зависящими от длительности импульса. Оптимизация конструкции с целью повышения эффективности излучения или демонстрация возможностей плазменных мазеров [5] по перестройке частот излучения и управления спектральным диапазоном в рамках текущей работы не ставились и будут предметом дальнейших исследований.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки, обладающей аксиальной симметрией, показана на рис. 1. Плазменный мазер с магнитной самоизоляцией, как и все приборы плазменной релятивистской СВЧ-электроники [5], основан на взаимодействии потока релятивистских электронов с попутной волной в заранее созданной плазме. Максимальная частота излучения зависит от концентрации плазмы, создаваемой перед каждым актом взаимодействия с электронами, она всегда меньше ленгмюровской частоты, может быть,

в 2–3 раза. Ширина спектра зависит, кроме прочего, от взаимного расположения плазмы и потока электронов: чем ближе электроны к плазме, тем шире спектр.

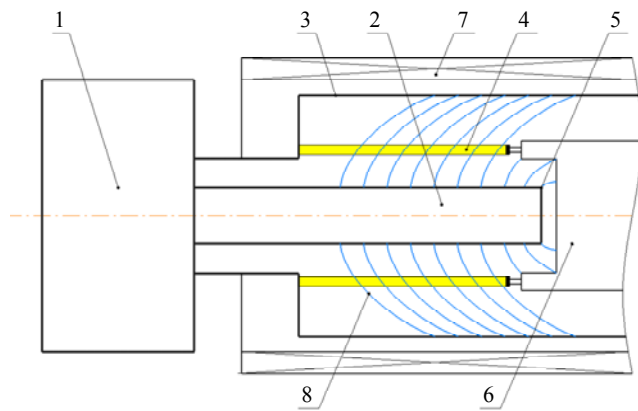


Рис. 1. Схема плазменного мазера – усилителя широкополосного шума: 1 – генератор высоковольтных импульсов; 2 – взрывоэмиссионный катод; 3 – заземленная камера; 4 – плазма; 5 – торцевой катод; 6 – коллектор; электрод коаксиального волновода; 7 – соленоид; 8 – траектории электронов

В качестве источника высоковольтных импульсов использовался генератор (1) с двойной формирующей линией и насыщенным ферритом для формирования импульса малой длительности, выходной импеданс генератора 33 Ом. Импульс напряжения куполообразной формы с длительностью около 3 нс имел амплитуду -550 кВ относительно заземленной камеры (3). В настоящей работе источник использовался в режиме формирования однократных импульсов.

На поверхности катода (2) с радиусом 3 см радиальное электрическое поле имело максимальную напряженность более 200 кВ/см. Ток по поверхности катода, убывающий от ~ 16 кА по мере приближения к коллектору вследствие эмиссии электронов, создавал азимутальное магнитное поле, также убывающее по радиусу от $\sim 0,1$ Тл. Часть тока, которая не была эмитирована с боковой поверхности катода, уходила с торцевого взрывоэмиссионного катода (5) на корпус коллектора (6), служащего центральным электродом коаксиального волновода для выхода излучения.

Плазма формировалась путем ионизации газа с давлением 0,3 Па отдельным пучком

электронов с энергиями 500 эВ и током до 100 А. Для создания электронного пучка использовалось магнитное поле 0,02 Тл соленоида (7), энергия на создание такого поля пренебрежимо мала по сравнению с прочими затратами энергии. Электроны с кольцевого термокатода распространялись с ларморовским радиусом до 0,25 см и ионизировали газ, создавая в течение 100 мкс трубчатую плазму с радиусом 7 см, толщиной ~ 1 см и концентрацией не более 10^{12} см $^{-3}$, если оценивать ее по результатам [9]. Специальные зондовые измерения параметров плазмы в данной работе не проводились.

Электроны (8) с катода (2) (см. рис. 1) распространяются в скрещенных полях, спадающих по радиусу – радиальном электрическом и азимутальном магнитном. В этих полях электроны приобретают аксиальную скорость, которая должна быть существенной на радиусе плазмы в области максимальной амплитуды медленной плазменной волны. Ток по катоду уменьшается слева направо на рис. 1 по мере эмиссии электронов с боковой поверхности, вследствие чего ослабевает и азимутальное магнитное поле. Расчеты [9] показали, что добавка слабого аксиального магнитного поля соленоида (7) к более сильному азимутальному магнитному полю тока по катоду (2) не оказывает существенного влияния на эффективность усиления и спектры СВЧ-волн в плазме.

Плазменная волна, усиленная на частотах шумов электронами с катода, преобразуется на границе с электродом (6) в моды коаксиального волновода. После перехода из коаксиального волновода в полый волновод круглого сечения с диаметром 30 см и частотой отсечки 0,6 ГГц для базовой моды TE $_{11}$ волна излучается через окно в атмосферу. Такое устройство выходного узла является традиционным для плазменных мазеров с шириной полосы частот излучения 2–3 октавы, а модовый состав их излучения всегда сложен.

Регистрация излучения осуществлялась с помощью широкополосного осциллографа, сигнал к которому приходил по широкополосному кабелю от антенны, калиброванной в широком частотном диапазоне. Мощность излучения рассчитывалась по нескольким десят-

кам измерений поля в различных точках диаграммы направленности излучения при различных поляризациях и нескольких повторах для каждой. Применение имеющегося широкоапертурного калориметра, который обычно используется для подобных измерений с целью повышения надежности и точности, было невозможно вследствие его недостаточной чувствительности для измерения слишком малой энергии коротких одиночных импульсов.

Обратим внимание на отличия плазменного мазера с магнитной самоизоляцией от существующих MLO помимо замедляющей структуры, которой является трубчатая плазма, а не пространственно-периодический волновод.

Во-первых, MLO работает как лампа обратной волны, у которой вывод излучения, как и у всех приборов сильноточной релятивистской СВЧ-электроники, сделан со стороны, противоположной источнику высоковольтных импульсов. Спектр генерируемого MLO излучения узкий, поэтому для отражения волны в сторону выходного волновода в MLO используется пространственно-периодический (т. н. дифракционный) отражатель с полосой непрозрачности на частоте СВЧ-генерации. В отличие от MLO, все плазменные мазеры работают как лампы бегущей волны, т. е. СВЧ-усилители, обычно в полосе частот 2–3 октавы. Для превращения усилителя в генератор необходимы отражения волны от границ плазменного резонатора, но в двойном коаксиальном волноводе плазменного мазера с магнитной самоизоляцией – на рис. 1 показаны внутренний (катод 2), средний (плазма 4) и внешний (камера 3) электроды этого волновода – организовать отражения волны с широким спектром непросто. Поэтому, в частности, для реализации мазера с магнитной самоизоляцией был выбран режим усиления шумов при малой длительности импульса без обратной связи в резонаторе длиной 38 см.

Во-вторых, короткий импульс плазменного мазера с магнитной самоизоляцией влечет значительные трудности при оптимизации работы устройства. Как и в MLO, траектории

электронов зависят от азимутального магнитного поля, которое определяется полным током, протекающим по катоду. В MLO с длительностями импульса в десятки и сотни наносекунд этот ток управляется зазором между торцевым катодом и корпусом коллектора, аналогичные элементы показаны на рис. 1 под номерами (5) и (6). Плавно управляя азимутальным магнитным полем, в MLO можно изменять траектории электронов, заставляя их максимально эффективно отдавать свою энергию волне. При малой длительности импульса ток и магнитное поле определяются радиальным профилем проводящих поверхностей, и настройка возможна только подбором формы и размера катода (2), что далеко не так удобно, как для MLO.

Результаты эксперимента

Как было подчеркнуто во Введении, единственной целью данной работы была демонстрация первого плазменного мазера на линии с магнитной самоизоляцией – источника СШП излучения, работающего в режиме усиления шумов. Как и все плазменные мазеры, усилитель шумов меняет спектр излучения при изменении концентрации плазмы. На рис. 2 показан спектр поля излучения от 0,6 ГГц (частоты отсечки выходного волновода) приблизительно до 2,5 ГГц. Мощность излучения, соответствующая этому спектру, превышала 500 МВт. При увеличении концентрации плазмы правая граница спектра смещалась в область 5 ГГц, как показано на рис. 2б, но при этом мощность излучения падала примерно до 100 МВт. Формы спектров не повторялись от импульса к импульсу, как и всегда при усилении шумов, напр., в [7].

Типичная осциллограмма электрической компоненты излучения с длительностью приблизительно 2 нс на выходе плазменного мазера показана на рис. 3. Напомним, что описанный выше метод регистрации излучения требовал для измерения полной мощности, как минимум, нескольких десятков импульсов при фиксированных параметрах плазмы.

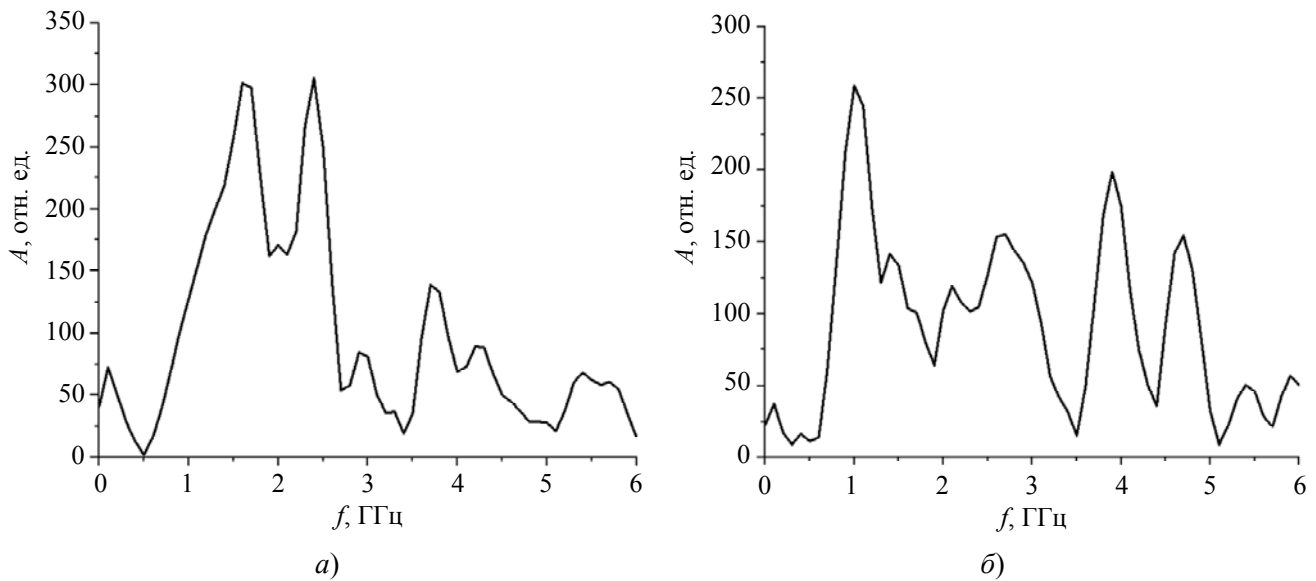


Рис. 2. Спектры поля выходного СВЧ-излучения: (а) с мощностью 500 МВт; (б) с мощностью 100 МВт

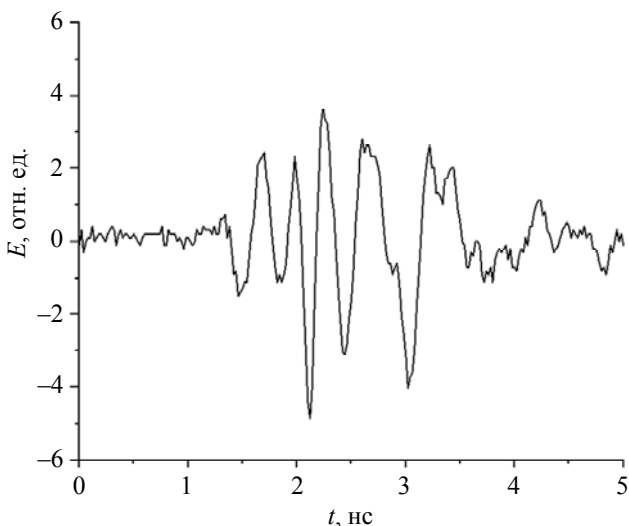


Рис. 3. Электрическое поле выходного СВЧ-излучения

Заключение

В демонстрационном эксперименте впервые показан плазменный мазер с магнитной самоизоляцией. Экспериментально доказано, что принцип магнитной самоизоляции применим к плазменным лазерам, и такое устройство может работать в режиме усиления шума в полосе частот 2–3 октавы на мультимегаваттном уровне мощности без сильного магнитного поля соленоида, требующего больших затрат электроэнергии.

Созданный плазменный мазер продемонстрировал «электронную» эффективность по мощности до 4 %, но лишь в узком частотном диапазоне 0,6–2,6 ГГц, при расширении

излучаемого диапазона частот мощность падала. Оптимизация конструкции возможна в ходе дальнейших исследований, когда будет создан источник трубчатой плазмы с диаметром 14 см, толщиной стенки ~1 см и концентрацией до 10^{13} см⁻³. Существующие в настоящее время источники плазмы для плазменных лазеров формируют трубчатую плазму такой плотности с площадью поперечного сечения на порядок ниже.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» по государственному контракту от 14.04.2022 № Н.4к.241.09.22.1062.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sullivan D. J. / IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. Vol. NS-30. № 4. P. 3426–3428.
2. Clark M. C., Marder B. M., Bacon L. D. / Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52. P. 78.
3. Li Zhi-Qiang, Zhong Hui-Huang, Fan Yu-Wei, Shu Ting, Qian Bao-Liang, Xu Liu-Rong, Zhao Yan-Song. / Chin. Phys. Lett. 2009. Vol. 26. № 5. P. 055201.
4. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gubanov V. P., Stepchenko A. S., Gunin A. V., Kurkan I. K. / Review of Sci. Instr. 2012. Vol. 83. P. 074705 (1–6).
5. Potapov A. V., Zavolokov E. V., Kondrat'ev A. A., Pkhaiko N. A., Sorokin I. A., Goncharenko B. G.,

- Luzanov V. A., Salov V. D. / Technical Physics. 2021. Vol. 66. P. 491–495.
6. Loza O. T., Shkvarunets A. G., Strelkov P. S. / IEEE Trans. on plasma science. 1998. Vol. 26. № 3. P. 615–627.
7. Buleyko A. B., Ponomarev A. V., Loza O. T., Ulyanov D. K., Sharypov K. A., Shunailov S. A., Yalandin M. I. / Physics of plasmas. 2021. Vol. 28. P. 023304. DOI: 10.1063/5.0031432
8. Litvin V. O., Loza O. T. / Physics of plasmas. 2018. Vol. 25. P. 013105.
9. Loza O. T., Ponomarev A. V., Strelkov P. S., Ulyanov D. K., Shkvarunets A. G. / Plasma Physics Reports. 1997. Vol. 23. № 3. P. 201–208.

PACS: 52.59.Ye

Plasma maser with magnetic self-insulation

A. B. Buleyko^{1,2}, V. P. Bakhtin¹, O. T. Loza^{2,1}, A. A. Ravaev¹, A. G. Bykov¹,
and L. V. Konovaltseva²

¹JSC «SRC RF TRINITI»

12 ow. Pushkovs st., Troitsk, Moscow, 108840, Russia

²Peoples' Friendship University of Russia

6 Miklukho-Maklay st., Moscow, 117198, Russia

Received 23.11.2022; revised 12.12.2022; accepted 19.12.2022

The first plasma maser operated as a magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) was created. A generator with the impedance of 33 Ohm was used to form single, 3 ns long pulses with the peak voltage of 550 kV. So short pulses determined the maser operation regime, namely, UWB noise amplification in the range of 0.6 to 5 GHz. The top measured wave electric field corresponded to the emission power above 500 MW.

Keywords: plasma maser, MILO, magnetic self-insulation, ultra-wide band (UWB), noise amplification.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-72-77

REFERENCES

- Sullivan D. J., IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-30** (4), 3426–3428 (1983).
- Clark M. C., Marder B. M. and Bacon L. D., Appl. Phys. Lett. **52**, 78 (1988).
- Li Zhi-Qiang, Zhong Hui-Huang, Fan Yu-Wei, Shu Ting, Qian Bao-Liang, Xu Liu-Rong and Zhao Yan-Song, Chin. Phys. Lett. **26** (5), 055201 (2009).
- Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gubanov V. P., Stepchenko A. S., Gunin A. V. and Kurkan I. K., Review of Sci. Instr. **83**, 074705 (1–6) (2012).
- Potapov A. V., Zavolokov E. V., Kondrat'ev A. A., Pkhaiko N. A., Sorokin I. A., Goncharenko B. G., Luzanov V. A. and Salov V. D., Technical Physics **66**, 491–495 (2021).
- Loza O. T., Shkvarunets A. G. and Strelkov P. S., IEEE Trans. on plasma science **26** (3), 615–627 (1998).
- Buleyko A. B., Ponomarev A. V., Loza O. T., Ulyanov D. K., Sharypov K. A., Shunailov S. A. and Yalandin M. I., Physics of plasmas **28**, 023304 (2021). DOI: 10.1063/5.0031432
- Litvin V. O. and Loza O. T., Physics of plasmas **25**, 013105 (2018).
- Loza O. T., Ponomarev A. V., Strelkov P. S., Ulyanov D. K. and Shkvarunets A. G., Plasma Physics Reports **23** (3), 201–208 (1997).