

Пикосекундные системы высокой мощности на основе линий магнитной компрессии

С.Н. Рукин*, Е.А. Аличкин, В.Е. Патраков, М.С. Педос, А.В. Пономарев, С.П. Тимошенко

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**rukin@iep.uran.ru*

Аннотация. В работе описан принцип построения мощных твердотельных пикосекундных систем на основе линий магнитной компрессии энергии и приведены последние результаты, полученные в этой области. Подход основан на использовании твердотельного SOS-генератора в качестве источника входных импульсов наносекундной длительности с последующим подключением линий магнитной компрессии (Magnetic Compression Lines, MCL). Конструктивно MCL, как и коаксиальная гиромагнитная нелинейная передающая линия (Nonlinear Transmission Line, NLTL), содержит ферритовые кольца, надетые на ее центральный проводник и намагниченные внешним продольным магнитным полем. Однако в описываемом подходе MCL работает не как источник мощных СВЧ колебаний напряжения, а как усилитель мощности входного импульса. При этом основная часть энергии входного импульса передается только в первый пик колебаний, который и представляет собой выходной импульс. На основе SOS+MCL-подхода разработана установка S-100, содержащая SOS-генератор и 4 последовательные линии магнитной компрессии энергии. На выходе установки получены импульсы мощностью 100 ГВт (амплитуда 2.2 МВ на нагрузке 48 Ом) и длительностью 100 пс (FWHM). Скорости нарастания напряжения и мощности составили 27 МВ/нс и 2 ТВт/нс соответственно. При переходе в линию с импедансом 7 Ом получены импульсы тока амплитудой 100 кА и скоростью нарастания выше 1 МА/нс.

Ключевые слова: твердотельная импульсная техника, мощные пикосекундные генераторы, линии магнитной компрессии энергии.

1. Линии магнитной компрессии энергии

Освоение пикосекундного диапазона длительности электрических импульсов в сочетании с переходом пиковой мощности генераторов из мегаваттного диапазона в диапазон единиц и десятков ГВт представляет собой перспективное направление развития мощной импульсной техники. Мощные пикосекундные генераторы востребованы в различных областях экспериментальной электрофизики. В первую очередь сюда относятся исследования быстропротекающих процессов электрического разряда в различных диэлектрических средах при экстремально высоких электрических полях, генерирование сверхкоротких пучков электронов и импульсов рентгеновского излучения в вакуумных диодах, формирование потоков убегающих электронов в газах, питание устройств мощной микроволновой электроники [1, 2].

В течение последних нескольких лет были проведены исследования по разработке нового подхода по генерированию мощных пикосекундных импульсов. Было показано, что гиромагнитная нелинейная передающая линия (Nonlinear Transmission Line, NLTL), содержащая надетые на внутренний электрод ферритовые кольца, намагниченные внешним магнитным полем, в определенных условиях может работать не только как генератор СВЧ колебаний [3–8], но и как усилитель мощности входного импульса [9–14]. Суть подхода, предложенного в [9] и развитого далее в [10], заключается в том, что линия работает в режиме магнитного компрессора энергии (Magnetic Compression Line, MCL), который реализуется при близких значениях длительности входного импульса напряжения и периода колебаний, генерируемых в линии (Рис. 1). В этом случае основная часть энергии входного импульса передается только в первый пик колебаний, который и представляет собой выходной импульс.

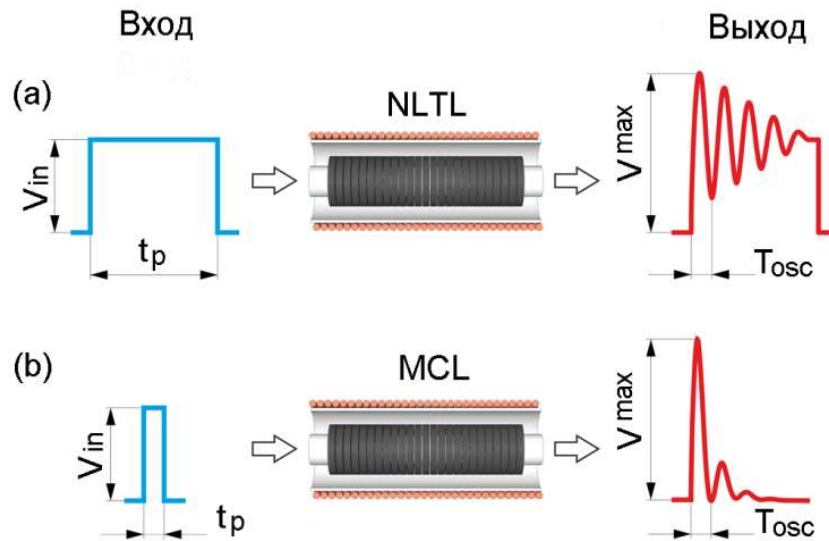


Рис. 1. Два режима работы нелинейной ферритовой линии NLTL: (a) NLTL генерирует мощные СВЧ колебания напряжения ($t_p > T_{osc}$); (b) линия работает в режиме MCL как усилитель входного импульса ($t_p \sim T_{osc}$).

Наиболее важные особенности MCL-подхода заключаются в следующем. Во-первых, не требуется использования каких-либо коммутирующих элементов — замыкающих или размыкающих. Усиление импульса по мощности и сжатие его во времени происходит автоматически в процессе прохождения импульса по линии. Во-вторых, подход позволяет использовать несколько последовательно соединенных линий, в каждой из которых происходит усиление мощности. В-третьих, MCL, будучи твердотельными устройствами, позволяют создавать полностью твердотельные пикосекундные генераторы при использовании твердотельного генератора входных импульсов. В частности, это реализуется в SOS+MCL-подходе, когда используется входной импульс от твердотельного генератора с полупроводниковым прерывателем тока (SOS) [12, 15].

Ранее, используя одну ступень сжатия импульса, было продемонстрировано преобразование входного импульса длительностью 7 нс и мощностью 6 ГВт в выходной импульс длительностью 2 нс и мощностью 13 ГВт [9]. Затем с использованием двухступенчатой системы компрессии энергии были получены импульсы мощностью 30 ГВт и длительностью 0.65 нс [10]. Далее были разработаны и исследованы 3-х и 4-х ступенчатые системы, в которых были реализованы пиковые мощности в диапазоне 50–80 ГВт при длительности импульса 100–170 пс [13, 14]. В настоящей работе, продолжающей исследования предложенного подхода, описывается 4-х ступенчатая импульсная система, обеспечивающая на нагрузке 48 Ом пиковую мощность 100 ГВт при длительности импульса 100 пс.

2. Пикосекундная импульсная система S-100

Конструкция основных элементов системы на основе SOS+MCL-подхода приведена на Рис. 2. Входной импульс в систему поступает от твердотельного генератора S-500, выходной узел которого содержит полупроводниковый прерыватель тока (SOS) [12, 15]. Система содержит четыре последовательные ступени компрессии энергии на линиях MCL1–MCL4. Выходной узел генератора S-500 и все линии заполнены трансформаторным маслом. Диаметры электродов линий (D и d) и ферритовых колец (D_f и d_f) приведены в Таблице 1. Таблица также содержит расчетные значения волнового сопротивления линий ρ при диэлектрической постоянной трансформаторного масла $\epsilon_{oil} = 2.25$, длину заполнения линии ферритом L_f , а также диапазон изменения продольного магнитного поля H_z в соленоидах.

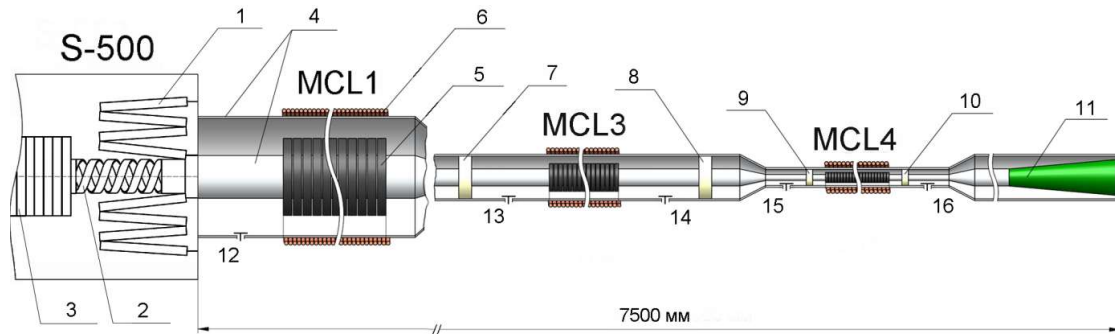


Рис. 2. Система компрессии энергии на линиях MCL1–MCL4: выходной узел SOS-генератора (1 – диоды прерывателя тока, 2 – индуктивный накопитель, 3 – ферритовый ключ); линии MCL (4 – наружный и внутренний проводники, 5 – ферритовые кольца, 6 – внешний соленоид). Другие компоненты: 7–10 – изоляторы; 11 – резистивная нагрузка; 12–16 – емкостные делители напряжения.

В линиях MCL1–MCL4 используются никель-цинковые ферритовые кольца марки 200ВНП с диаметрами, указанными в Таблице 1, надетыми на внутренний электрод линии. Для создания продольного магнитного поля смещения H_z служат соленоиды (поз. 6 на Рис. 2). Каждый соленоид имеет свой источник питания для независимой регулировки магнитного поля смещения.

Таблица 1. Параметры линий магнитной компрессии энергии.

Линия	D/d , мм	D_f/d_f , мм	ρ , Ом	L_f , мм	ΔH_z , кА/м
MCL1	275/102	180/110	39.7	900	0–40
MCL2	101/37	65/40	40.2	720	0–120
MCL3	38/14	24/16	39.9	420	0–170
MCL4	22/8	12/8	40.5	350	0–370

Герметичные изоляторы 7–10 служат для разделения объемов линий при создании в них избыточного давления масла с целью увеличения электрической прочности. При этом генератор S-500 и первая линия MCL1 имеют общий масляный объем и работают при атмосферном давлении, а линии MCL2–MCL4 заполняются маслом отдельно. В MCL2 создается избыточное давление около 3 атм, а в MCL3 и MCL4 – до 25 атм. На выходе линий размещается резистивная нагрузка (поз. 11), в качестве которой используются угольные резисторы марки ТВО. Суммарная длина линий MCL1–MCL4, включая резистивную нагрузку, составляет 7.5 м. Полная длина системы вместе с генератором S-500 – около 15 м.

Импульсы напряжения в линиях регистрируются емкостными делителями напряжения (поз. 12–16). Для регистрации сигналов нано- и субнаносекундной длительности (делители 12–13) применяется осциллограф DPO 70404C с полосой пропускания 4 ГГц. Делители калибруются тестовым импульсом с фронтом 200 пс. При измерении пикосекундных импульсов после линий MCL3 и MCL4 используется измерительная коаксиальная секция (на Рис. 2 не показана) с диаметрами внешнего и внутреннего проводников 50 и 15 мм ($\rho = 48$ Ом). Импульсы регистрируются осциллографом TDS 6154C с активной полосой пропускания 15 ГГц. В канале регистрации используются кабели Eason 4C (18 ГГц) и ослабители сигнала с полосой пропускания 30 ГГц. Делители в измерительной секции калибруются тестовым импульсом с фронтом 70 пс. При измерениях также учитывается затухание сигнала в измерительных кабелях.

3. Результаты экспериментов

По сравнению с нашими предыдущими работами [9–10, 13–14] генератор S-500 был модернизирован – величина обрываемого тока увеличена с 14 до 17 кА, что привело к

увеличению выходной мощности с 6 до 8.5 ГВт (650 кВ на нагрузке 50 Ом). В связи с этим все линии вновь оптимизировались по числу ферритовых колец (длина ферритового заполнения L_f) и по величине магнитного поля H_z . Были получены следующие оптимальные значения этих параметров. Длина ферритового заполнения линий MCL1–MCL4: 900, 720, 420 и 350 мм, соответственно. Оптимальная величина магнитного поля в соленоидах: 26, 94, 110 и 308 кА/м, соответственно.

Типичные осциллограммы импульсов мощности, иллюстрирующие процесс компрессии энергии в системе в целом для линий MCL1–MCL4 в оптимальных условиях (длина ферритового заполнения и магнитное поле в соленоидах) приведены на Рис. 3. Изменение мощности и длительности импульса при прохождении импульса вдоль линий MCL1–MCL4 показано на Рис. 4. Параметры импульсов после обработки приведены в Таблице 2.

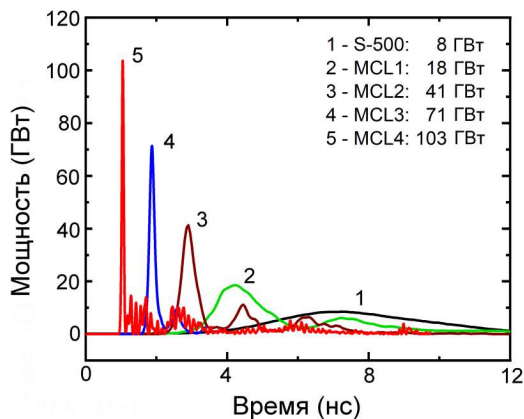


Рис. 3. Импульсы мощности в системе, иллюстрирующие процесс компрессии энергии: 1 – входной импульс, 2 – после линии MCL1, 3 – после линии MCL2, 4 – после линии MCL3, 5 – выходной импульс.

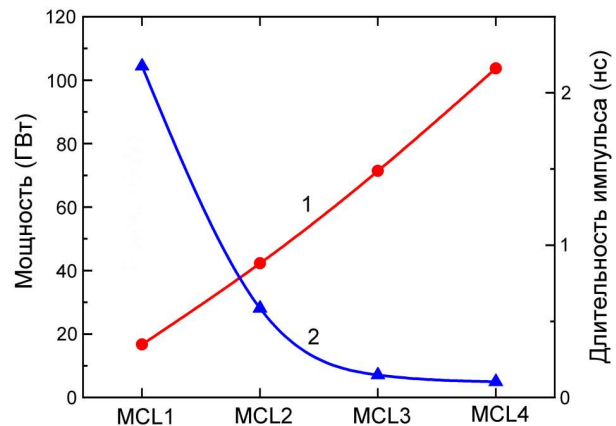


Рис. 4. Изменение мощности (кривая 1) и длительности импульса на полувысоте (FWHM, кривая 2) при его прохождении вдоль линий MCL1–MCL4.

Таблица 2. Параметры входного импульса и импульсов после линий MCL1–MCL4. H_z – магнитное поле соленоида, V^{max} – амплитуда выходного импульса, P^{max} – пиковая мощность, $FWHM$ – длительность импульса на полувысоте, E – энергия основного импульса (первый пик), t_r – фронт импульса по уровню 0.2–0.9 от амплитуды, $(dV/dt)^{max}$, $(dI/dt)^{max}$, $(dP/dt)^{max}$ – максимальные скорости нарастания напряжения, тока и мощности.

Импульс	H_z (кА/м)	V^{max} (МВ)	P^{max} (ГВт)	$FWHM$ (нс)	E (Дж)	t_r (0.2–0.9) (нс)	$(dV/dt)^{max}$ (МВ/нс)	$(dI/dt)^{max}$ (кА/нс)	$(dP/dt)^{max}$ (ТВт/нс)
Входной	-	0.65	8.5	7.1	59.8	3.0	0.20	5.11	0.005
MCL1	26	0.82	18.4	2.2	37.8	1.0	0.98	24.4	0.03
MCL2	94	1.28	41.3	0.58	20.6	0.34	3.3	82.6	0.16
MCL3	110	1.85	71.4	0.15	9.7	0.09	18.6	387	1.02
MCL4	308	2.23	103.6	0.1	8.7	0.07	27.4	570	2.03

Таким образом, для пикосекундных, а также для твердотельных генераторов электрических импульсов реализовано рекордно высокое значение пиковой мощности – 103.6 ГВт (2.23 МВ на нагрузке 48 Ом) при длительности импульса 100 пс (Рис. 5). Также получены рекордно высокие значения скорости нарастания напряжения, тока и мощности: 27.4 МВ/нс, 570 кА/нс и 2 ТВт/нс, соответственно.

Была исследована возможность увеличения амплитуды тока пикосекундного выходного импульса. После линии MCL4 устанавливался конический переход длиной 220 мм, в котором диаметр наружного электрода линии возрастал от 22 до 50 мм, а диаметр внутреннего электрода – с 8 до 42 мм. При этом импеданс линии снижался с 40.5 Ом до 7 Ом. Осциллограмма импульса тока в линии с импедансом 7 Ом приведена на Рис. 5б.

Амплитуда импульса тока составила 103 кА, время нарастания – 74 пс по уровню 0.2–0.9 от амплитудного значения. Скорость нарастания тока была увеличена до 1.18 МА/нс.

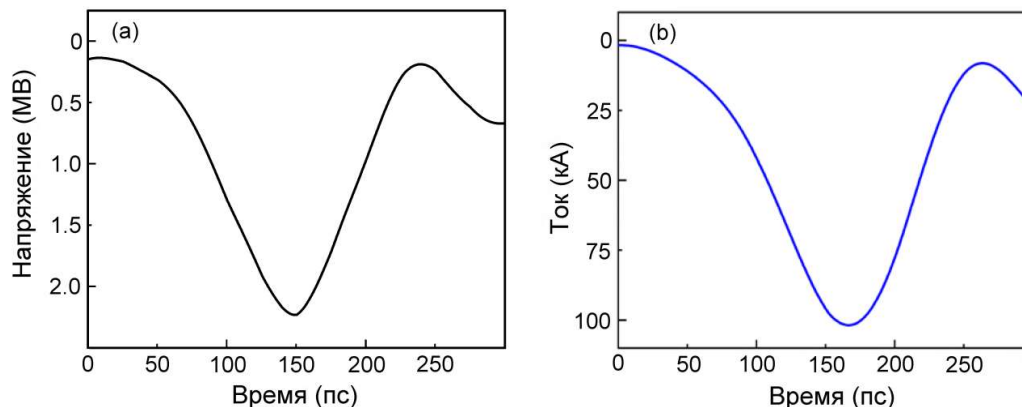


Рис. 5. Осциллограммы выходных импульсов в режиме максимальной мощности при $\rho = 48$ Ом (а) и в режиме максимального тока при $\rho = 7$ Ом (б).

Эксперименты также демонстрируют основное ограничение описываемого метода увеличения мощности импульсных систем, которое определяется необходимостью уменьшения поперечных размеров линий при переходе от предыдущей ступени к следующей (оптимальное уменьшение – около 2.7–2.8 раза [10]). В результате происходит резкое увеличение электрического поля в линии. Так, в MCL4 на внутреннем проводнике линии электрическое поле достигает величины 5.5 МВ/см, что требует увеличения давления масла до 25 атм.

4. Заключение

В работе на основе SOS+MCL-подхода (SOS-генератор с линиями магнитной компрессии энергии) в 4-х ступенчатой системе получены сверхмощные пикосекундные импульсы. На выходе четвертой линии (импеданс измерительной секции 48 Ом) при длительности импульса 100 пс и амплитуде импульса 2.2 МВ достигнута пиковая мощность 100 ГВт. Использование конического перехода в линию с импедансом 7 Ом позволило увеличить амплитуду импульса тока до 100 кА. Для генераторов электрических импульсов реализованы рекордно высокие скорости нарастания выходного напряжения (27.4 МВ/нс, нагрузка 48 Ом), мощности (2 ТВт/нс, 48 Ом) и тока (1.18 МА/нс, 7 Ом).

5. Список литературы

- [1] Г.А. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника*. Москва: Наука, 2004.
- [2] G.A. Mesyats and M.I. Yalandin, High-power picosecond electronics, *Physics-Uspekhi*, vol. **48**, 211, 2005, doi: 10.1070/PU2005v048n03ABEH002113
- [3] V.P. Gubanov, A.V. Gunin, O.B. Koval'chuk, V.O. Kutenkov, I.V. Romanchenko, and V.V. Rostov, Effective transformation of the energy of high-voltage pulses into high-frequency oscillations using a saturated-ferrite-loaded transmission line, *Technical Physics Letters*, vol. **35**, 626, 2009, doi: 10.1134/S1063785009070116
- [4] I.V. Romanchenko and V.V. Rostov, Energy levels of oscillations in a nonlinear transmission line filled with saturated ferrite, *Technical Physics*, vol. **55**, 1024, 2010, doi: 10.1134/S1063784210070170
- [5] J.-W.B. Bragg, J.C. Dickens, and A.A. Neuber, Ferrimagnetic Nonlinear Transmission Lines as High-Power Microwave Sources, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **41**, 232, 2013, doi: 10.1109/TPS.2012.2226169

-
- [6] I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, A.V. Gunin, and V.Yu. Konev, High power microwave beam steering based on gyromagnetic nonlinear transmission lines, *J. Appl. Phys.*, vol. **117**, 214907, 2015, doi: 10.1063/1.4922280
- [7] Y. Cui, J. Meng, L. Huang, Y. Yuan, H. Wang, and D. Zhu, Operation analysis of the wideband high-power microwave sources based on the gyromagnetic nonlinear transmission lines, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **92**, 034702, 2021, doi: 10.1063/5.0040323
- [8] П.В. Припутнев, И.В. Романченко, В.В. Ростов, Системы и технологии на основе нелинейных передающих линий с ферритом (обзор), *ЖТФ*, том **93**, 595, 2023, doi: 10.21883/JTF.2023.05.55453.230-22
- [9] A.I. Gusev, M.S. Pedos, S.N. Rukin, and S.P. Timoshenkov, Solid-state repetitive generator with a gyromagnetic nonlinear transmission line operating as a peak power amplifier, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **88**, 074703, 2017, doi: 10.1063/1.4993732
- [10] A.I. Gusev, M.S. Pedos, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov and S.N. Tsyranov, A 30 GW subnanosecond solid-state pulsed power system based on generator with semiconductor opening switch and gyromagnetic nonlinear transmission lines, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **89**, 094703, 2018, doi: 10.1063/1.5048111
- [11] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, and M.I. Yalandin, Multistage converter of high-voltage subnanosecond pulses based on nonlinear transmission lines, *J. Appl. Phys.*, vol. **126**, 084504, 2019, doi: 10.1063/1.5110438
- [12] S.N. Rukin, Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **91**, 011501, 2020, doi: 10.1063/1.5128297
- [13] E.A. Alichkin, M.S. Pedos, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov, and S.Y. Karelin, Picosecond solid-state generator with a peak power of 50 GW, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **91**, 104705, 2020, doi: 10.1063/5.0017980
- [14] S.N. Rukin, A.V. Ponomarev, E.A. Alichkin, S.P. Timoshenkov, M.S. Pedos, and K.A. Sharypov, Generation of Multi-Gigawatt Picosecond Pulses by Magnetic Compression Lines, 2020 *Proceedings of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, 92, Tomsk, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241919
- [15] A.I. Gusev, M.S. Pedos, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov, and S.N. Tsyranov, A 6 GW nanosecond solid-state generator based on semiconductor opening switch, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **86**, 114706, 2015, doi: 10.1063/1.4936295
- [16] V.E. Patrakov, S.N. Rukin, Computer simulation of multi-gigawatt magnetic compression lines, *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, 606, Tomsk, 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S6-P-017001