

## Пикосекундный магнитный компрессор гигаваттного уровня мощности

*М.С. Педос<sup>\*</sup>, Е.А. Аличкин, В.Е. Патраков, А.В. Пономарев, С.Н. Рукин,  
С.П. Тимошенков, С.Н. Цыранов*

*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*<sup>\*</sup>pedos\_ms@mail.ru*

**Аннотация.** В работе описана пикосекундная твердотельная система с пиковой мощностью в десятки ГВт, состоящая из SOS-генератора, формирующего входной импульс, и магнитного компрессора, содержащего 4 последовательно соединенные линии магнитной компрессии энергии (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. Но режим работы MCL отличается, поскольку MCL работает при близких значениях длительности входного импульса напряжения и периода колебаний, генерируемых в линии. В этом случае основная часть энергии входного импульса передается только в первый пик колебаний, который и представляет собой выходной импульс. Входной импульс от SOS-генератора имеет пиковую мощность 6 ГВт (490 кВ, 40 Ом) и длительность 7 нс. Четырехступенчатый компрессор увеличивает мощность импульса до 87 ГВт (2.05 МВ, 48 Ом) и сжимает его во времени до 92 пс (FWHM) при длительности фронта импульса 59 пс по уровню 0.2–0.9 от амплитудного значения. Реализованы рекордно высокие значения скорости нарастания напряжения, тока и мощности, составляющие 29.5 МВ/нс, 0.74 МА/нс и 1.95 ТВт/нс, соответственно. Основное внимание в исследованиях уделено работе последней линии компрессора, MCL4, в которой реализуются максимальные электрические и магнитные поля, достигающие 6 МВ/см и 1.6 МА/м. Экспериментальные результаты сравниваются с результатами численного моделирования.

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

### 1. Введение

Одно из перспективных направлений развития мощной импульсной техники состоит в освоении пикосекундного диапазона длительности импульса в сочетании с увеличением пиковой мощности от сотен МВт до единиц ГВт и более. Мощные пикосекундные генераторы востребованы в различных областях экспериментальной электрофизики. В частности, сюда относятся исследования быстропротекающих процессов электрического разряда в различных 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]. По всей видимости, по мере усовершенствования таких устройств и освоения более высоких уровней пиковой мощности в пикосекундном диапазоне будут возникать и новые области применения, которые в настоящее время в полной мере еще не обозначены.

В течение последних 5 лет ситуация в области генерирования мощных пикосекундных импульсов изменилась кардинальным образом. Оказалось, 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 [3–7], но и как усилитель мощности входного видеоимпульса [8–13]. Суть подхода, предложенного в [8] и развитого далее в [9], 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.

В этом случае основная часть энергии входного импульса передается только в первый пик колебаний, который и представляет собой выходной импульс.

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 последовательных ступеней сжатия энергии импульса, в каждой из которых происходит усиление мощности. В-третьих, MCL, будучи твердотельными устройствами, позволяют создавать полностью твердотельные пикосекундные генераторы при использовании твердотельного драйвера входных импульсов. В частности, это реализуется в SOS+MCL подходе, когда используется входной импульс от твердотельного генератора с полупроводниковым прерывателем тока (SOS) [11, 14].

В настоящей работе, которая продолжает исследования [8–13], описывается генератор с четырехступенчатой системой компрессии энергии на линиях MCL1–MCL4. Основное внимание уделено работе последней линии компрессора, MCL4, в которой реализуются максимальные электрические и магнитные поля. Достигнута пиковая мощность импульса 87 ГВт (2.05 МВ, 48 Ом) при длительности импульса около 90 пс (FWHM). Процесс сжатия импульса исследуется как экспериментально, так и с использованием методов численного моделирования.

## 2. Экспериментальная система

Конструкция системы компрессии энергии на основе SOS+MCL подхода приведена на Рис.1. Входной импульс в систему поступает от твердотельного генератора S-500, выходной импульс которого формируется полупроводниковым прерывателем тока (SOS) [11, 14]. 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. В линии четвертой ступени сжатия, MCL4, было исследовано три варианта линий, отличающихся друг от друга поперечными размерами. Таблица также содержит расчетные значения волнового сопротивления линий  $\rho$  при диэлектрической постоянной трансформаторного масла  $\epsilon_{oil} = 2.25$ , а также диапазон изменения продольного магнитного поля  $H_z$  в соленоидах.

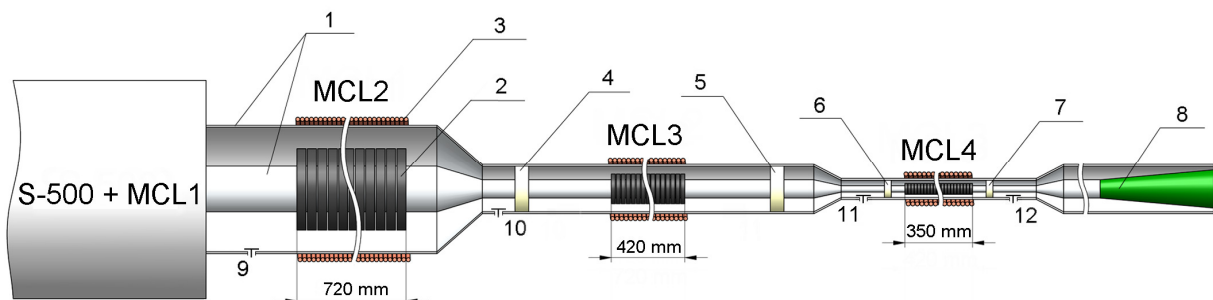


Рис.1. Система компрессии энергии на линиях MCL1–MCL4. Каждая линия содержит наружный и внутренний проводники (1), ферритовые кольца (2) и внешний соленоид (3). Другие компоненты: 4–7 – изоляторы; 8 – резистивная нагрузка; 9–12 – емкостные делители напряжения.

Линии MCL1–MCL4 образованы ферритовыми кольцами из материала NiZn с диаметрами, указанными в Таблице 1, надетыми на внутренний электрод линии. В кольцах начальная проницаемость лежит в диапазоне 200–1000, индукция насыщения – 0.32–0.4 Т,

коэрцитивная сила – 32–80 А/м, остаточная индукция – около 0.15 Т и температура Кюри не менее 110°С. Для создания продольного магнитного поля смещения  $H_z$  служат соленоиды (поз. 3 на Рис.1), которые обеспечивают магнитное поле до 40, 90, 200 и 370 кА/м в линиях MCL1, MCL2, MCL3 и MCL4 соответственно. Длины линий MCL2–MCL4, указанные на Рис.1, приведены для оптимального числа колец.

Таблица 1. Параметры линий магнитной компрессии энергии

Линия	$D/d$ , мм	$D_f/d_f$ , мм	$\rho$ , $\Omega$	$\Delta H_z$ , кА/м
MCL1	275/102	180/110	39.7	0–40
MCL2	101/37	65/40	40.2	0–90
MCL3_50	50/18.5	32/20	39.8	0–200
MCL3_38	38/14	24/16	39.9	0–200
MCL4_22	22/8	12/8	40.5	0–370
MCL4_20	20/8	12/8	36.6	0–370
MCL4_18	18/8	12/8	32.4	0–370

Герметичные изоляторы 4–7 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 20 атм. На выходе линий размещается резистивная нагрузка (поз. 8), в качестве которой используются угольные резисторы марки ТВО либо раствор NaCl в воде.

Импульсы напряжения в линиях регистрируются емкостными делителями напряжения (поз. 9–12). Для регистрации сигналов нано- и субнаносекундной длительности (делители 9–10) применяется осциллограф DPO 70404C с полосой пропускания 4 ГГц. Делители калибруются тестовым импульсом с фронтом 200 пс. Пикосекундные импульсы после линий MCL3 и MCL4 регистрируются делителями 11–12, которые калибруются импульсом с фронтом 50 пс. В качестве регистратора применяется осциллограф DPO 73304D с полосой пропускания 33 ГГц. Измерительные кабели типа SFT–393 (26 ГГц) и ослабители сигнала с полосой пропускания 30 ГГц входят в состав измерительных трактов при регистрации пикосекундных сигналов. При измерениях учитывается затухание сигнала в измерительных кабелях.

### 3. Результаты экспериментов

Параметры линий MCL1–MCL3 соответствовали оптимальным значениям, приведенным в [12], и в экспериментах не изменялись: длина ферритового заполнения 900 мм и поле смещения  $H_z = 32$  кА/м для MCL1, 720 мм и 65 кА/м для MCL2 и 420 мм и 106 кА/м для MCL3. В качестве входного импульса в четвертую ступень компрессии энергии MCL4 использовался импульс, генерируемый в линии третьей ступени с наружным диаметром 50 мм – MCL3\_50 (см. Таблица 1). В четвертой ступени компрессии энергии были исследованы 3 линии – MCL4\_22, MCL4\_20 и MCL4\_18, в которых диаметр внутреннего проводника (8 мм) и диаметры ферритовых колец (8/12 мм) не менялись, а наружный диаметр линии изменялся от 18 до 22 мм. При этом волновое сопротивление линий на участке без ферритовых колец изменялось от 32.4 до 40.5 Ом (см. Таблица 1).

Линии четвертой ступени оптимизировались по числу колец в линии (длина линии от 0 до 400 мм с шагом 50 мм). При каждой длине ферритового заполнения проводились измерения параметров выходного импульса при изменении магнитного поля  $H_z$ . Максимальные значения достигнутых параметров в процессе оптимизации линий отражены

в Таблице 2, а на Рис.2 приведены осциллограммы входного импульса и выходного импульса с максимальной пиковой мощностью.

**Таблица 2.** Выходные параметры линий четвертой ступени компрессии энергии

Линия	$V^{max}$ , МВ	$P^{max}$ , ГВт	FWHM, пс	$dV/dt$ , МВ/нс	$dP/dt$ , ТВт/нс	$dI/dt$ , кА/нс
MCL3_50	1.477	45.4	251.6	7.68	0.39	175.8
MCL4_22	2.047	87.3	91.5	28.41	1.95	644.5
MCL4_20	2.038	86.6	96.5	24.59	1.72	586.6
MCL4_18	2.032	86.1	86	29.49	1.77	747.8

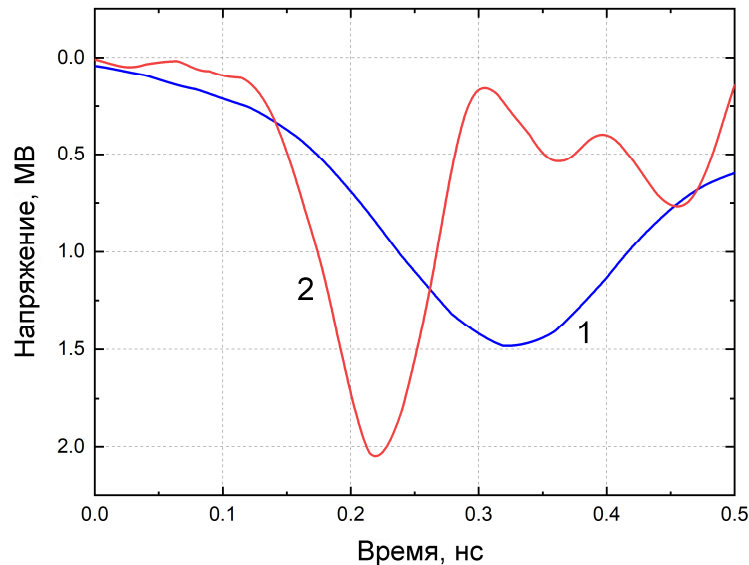


Рис.2. Осциллограммы входного импульса напряжения от линии MCL3\_50 (1) и выходного после линии MCL4\_22 (2) с максимальной амплитудой напряжения и пиковой мощностью.

Максимальная мощность при выходном напряжении 2.05 МВ (измерительная секция с сопротивлением 48 Ом) составила 87.3 ГВт при длительности импульса 92 пс и была реализована в линии MCL4\_22. В этой же линии была получена и рекордно высокая скорость нарастания мощности – 1.95 ТВт/нс. В линии MCL4\_18 были получены близкие значения напряжения и мощности (2.03 МВ и 86 ГВт) при длительности импульса 86 пс. В этой же линии были реализованы максимально высокие значения скорости нарастания тока (0.75 МА/нс) и напряжения (29.5 МВ/нс).

Полученные в эксперименте осциллограммы напряжения и мощности при оптимизации работы линий четвертой ступени (сканирование по длине ферритового заполнения линии) также использовались для последующего сравнения с расчетными кривыми (см. Рис.3).

#### 4. Расчетные результаты

Механизм работы линии магнитной компрессии основан на взаимодействии азимутального магнитного поля, создаваемого в феррите протекающим по линии током, с вектором намагниченности ферритовой среды. Расчетная модель основана на решении уравнений Максвелла и уравнения Ландау-Лившица, описывающего динамику процесса намагничивания ферритов. Система уравнений решается с использованием пакета COMSOL Multiphysics [15].

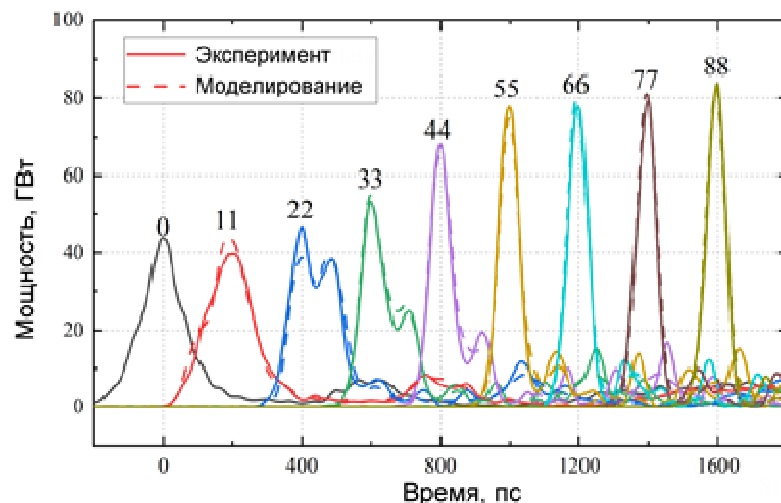


Рис.3. Процесс трансформации импульса мощности при его распространении вдоль линии MCL4\_22: сравнение результатов эксперимента и моделирования. Цифры у кривых соответствуют числу ферритовых колец в линии.

Процесс усиления мощности импульса при его прохождении через линию магнитной компрессии иллюстрируется на Рис.3, где приведены экспериментальные и расчетные формы импульсов мощности при различном количестве ферритовых колец в линии (при различной длине ферритового заполнения линии). В начале процесса (22 кольца) происходит разделение импульса на две части, одна из которых затем становится основным импульсом, а другая – вспомогательным. При этом усиление мощности происходит как за счет сжатия основного импульса по длительности, так и за счет перетекания энергии из вспомогательного импульса в основной импульс. В конце линии (последние распределения при числе ферритовых колец 66–88) рост мощности выходит на участок насыщения.

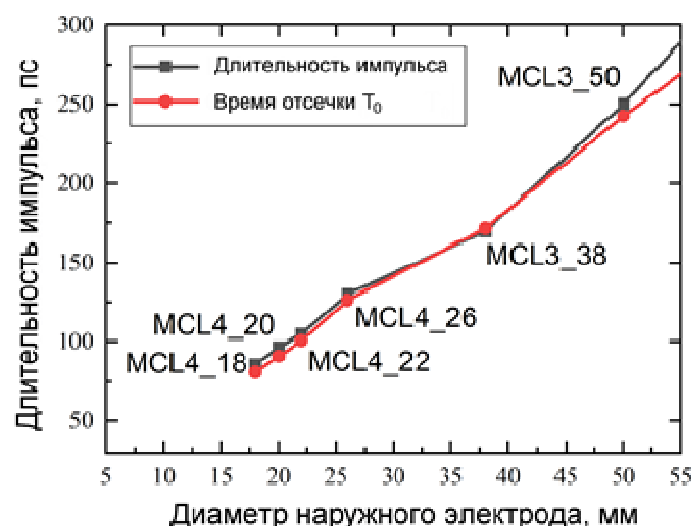


Рис.4. Сравнение экспериментальных значений длительности импульса на полувывоте на выходе линий различных диаметров и расчетного значения времени отсечки  $T_0$  для этих линий.

Участок насыщения обусловлен достижением длительности импульса своего предельно малого значения для поперечной ТЕМ-волны – времени отсечки  $T_0$ , равному двойному времени пробега электромагнитной волны между внутренним и наружным электродами

линии. Это положение иллюстрируется хорошим согласием экспериментальных значений длительности импульса на выходе линий с расчетным временем отсечки  $T_0$  (Рис.4).

## 5. Заключение

На основе SOS+MCL подхода (SOS-генератор с линиями магнитной компрессии энергии) в 4-х ступенчатой системе получены сверхмощные пикосекундные импульсы. На выходе четвертой ступени при длительности импульса около 90 пс и амплитуде импульса 2 МВ достигнута пиковая мощность 87 ГВт. Для генераторов электрических импульсов реализованы рекордно высокие скорости нарастания выходного напряжения (29.5 МВ/нс), тока (0.74 МА/нс) и мощности (1.95 ТВт/нс).

Экспериментально и методами численного моделирования исследован процесс усиления мощности импульса при его прохождении через линию магнитной компрессии. Показано, что рост мощности за счет снижения длительности импульса в процессе усиления ограничен поперечными размерами линии.

## 6. Литература

- [1] Месяц Г.А., *Импульсная энергетика и электроника*. (Москва: Наука, 2004).
- [2] Месяц Г.А., Яландин М.И., *УФН*, **175**(3), 225, 2005; doi: 10.1070/PU2005v048n03ABEH002113
- [3] Губанов В.П., Гунин А.В., Ковальчук О.Б., Кутенков В.О., Романченко И.В., Ростов В.В., *Письма в ЖТФ*, **35**(13), 81, 2009; doi: 10.1134/S1063785009070116
- [4] Романченко И.В., Ростов В.В., *ЖТФ*, **80**(7), 111, 2010; doi: 10.1134/S1063784210070170
- [5] Bragg J.-W.B., Dickens J.C., Neuber A.A., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41**, 232, 2013; doi: 10.1109/TPS.2012.2226169
- [6] Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gunin A.V., Konev V.Yu., *J. Appl. Phys.*, **117**, 214907, 2015; doi: 10.1063/1.4922280
- [7] Cui Y., Meng J., Huang L., Yuan Y., Wang H., Zhu D., *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 034702, 2021; doi: 10.1063/5.0040323
- [8] Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 074703, 2017; doi: 10.1063/1.4993732
- [9] Gusev A.I., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N., *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 094703, 2018; doi: 10.1063/1.5048111
- [10] Ulmaskulov M.R., Shunailov S.A., Sharypov K.A., Yalandin M.I., *J. Appl. Phys.*, **126**, 084504, 2019; doi: 10.1063/1.5110438
- [11] Rukin S.N., *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 011501, 2020; doi: 10.1063/1.5128297
- [12] Alichkin E.A., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Karelin S.Y., *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 104705, 2020; doi: 10.1063/5.0017980
- [13] Rukin S.N., Ponomarev A.V., Alichkin E.A., Timoshenkov S.P., Pedos M.S., Sharypov K.A., *21st International Symposium on High-Current Electronics*, 92, Tomsk, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241919
- [14] Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N., *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 114706, 2015; doi: 10.1063/1.4936295
- [15] COMSOL Multiphysics General-Purpose Simulation Software [online]; <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>