



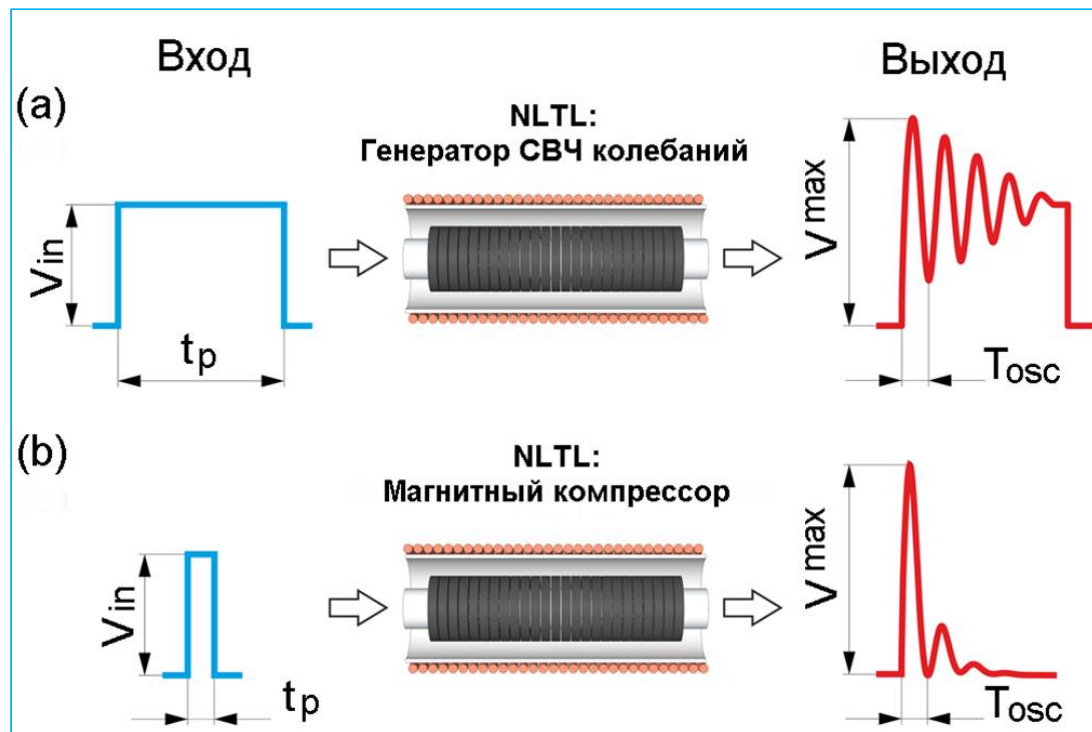
Российская Академия наук
Институт электрофизики
Лаборатория импульсной техники

Генерирование мультигигаваттных субнаносекундных импульсов гироманнитными линиями

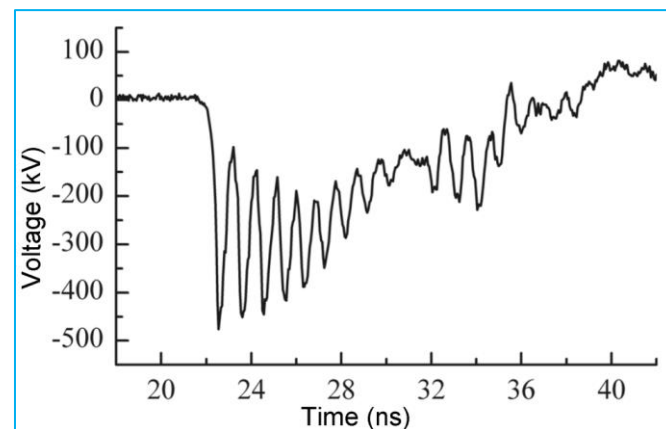
М.С. Педос, С.Н. Рукин, С.П. Тимошенко,
Е.А. Аличкин

22-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург
2021

Введение



V. V. Rostov et al. "Effective Transformation of the Energy of High Voltage Pulses into High Frequency Oscillations Using a Saturated Ferrite Loaded Transmission Line," Tech. Phys. Lett. **35**, 626–628 (2009)



FWHM ~ 9 ns, $T_{osc} \sim 0.9$ ns ($f = 1.1$ GHz)
 Амплитуда входного импульса ~ 300 kV
 Амплитуда первого пика колебаний ~ 450 kV

Режимы работы гиромангнитной нелинейной передающей линии (NLTL) :

- (a) NLTL работает как источник СВЧ колебаний ($t_p \gg T_{osc}$)
- (b) NLTL работает как линия магнитной компрессии (MCL) с увеличением пиковой мощности ($t_p \sim T_{osc}$)

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. **88**, 074703 (2017).

Расчеты Романченко и Ростова :

$$V_{max} = \sqrt{2} V_{in}$$

Коэффициент усиления мощности

Коэффициент усиления мощности линии магнитной компрессии (MCL) описывается выражением :

$$(1) \quad K_P = \frac{P_2^{max}}{P_1^{max}} = \frac{t_{1(b)}}{T_{osc}} \cdot \eta = K_c \cdot \eta$$

где K_P - коэффициент усиления мощности (отношение пиковых мощностей выходного и входного импульсов), $t_{1(b)}$ - длительность входного импульса по основанию, T_{osc} - период колебаний, генерируемых в линии, $\eta = W_2/W_1$ - эффективность преобразования импульса, равная отношению энергий выходного и входного импульсов, а $K_c = t_{1(b)}/T_{osc}$ - коэффициент сжатия импульса по времени.

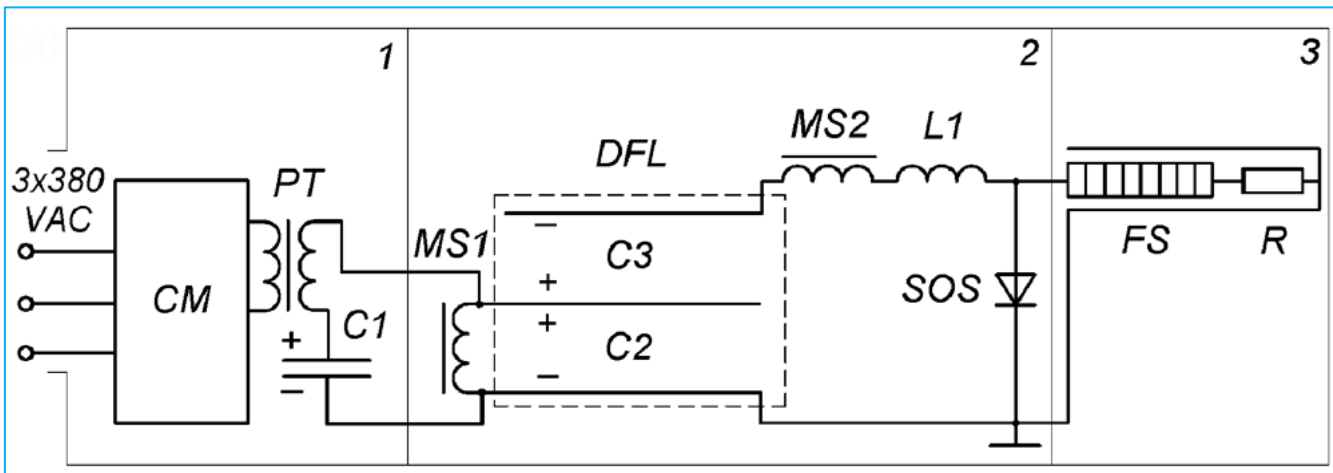
При $K_P = 2$ и $\eta \sim 0,5-0,7$ оптимальный коэффициент сжатия K_c из (1) должен находиться в диапазоне $\sim 3-4$. Это требует пропорционального увеличения частоты колебаний в линии за счет увеличения азимутального магнитного поля H_θ в ферритовых кольцах, так как $T_{osc} \sim 1/H_\theta$. С учетом $K_P = 2$ (увеличение амплитуды импульса тока в линии в $\sim 1,4$ раза) необходимое увеличение азимутального поля при переходе от предыдущей стадии усиления импульса к следующей достигается за счет уменьшения диаметров проводников линии и ферритовых колец в $\sim 2,0-2,8$ раза.

Генератор S-500



Выходные параметры генератора S-500

Нагрузка	40–125 Ω
Напряжение	500–900 kV
FWHM	~7 ns
Мощность	~6 GW
Частота	до 1 kHz

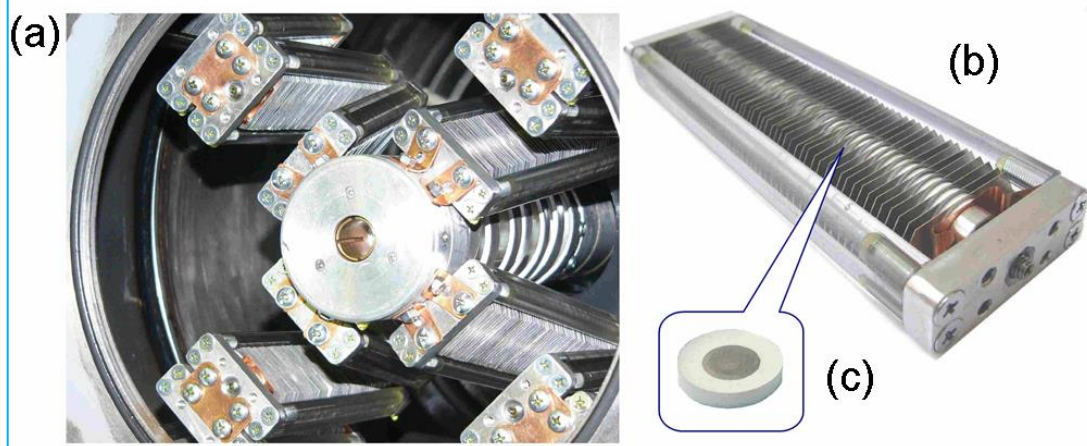


Параметры ключа (SOS)

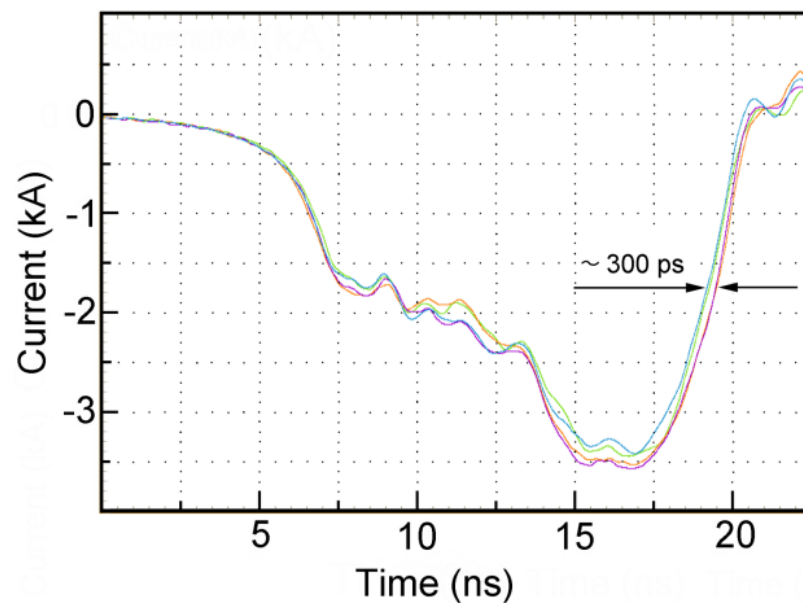
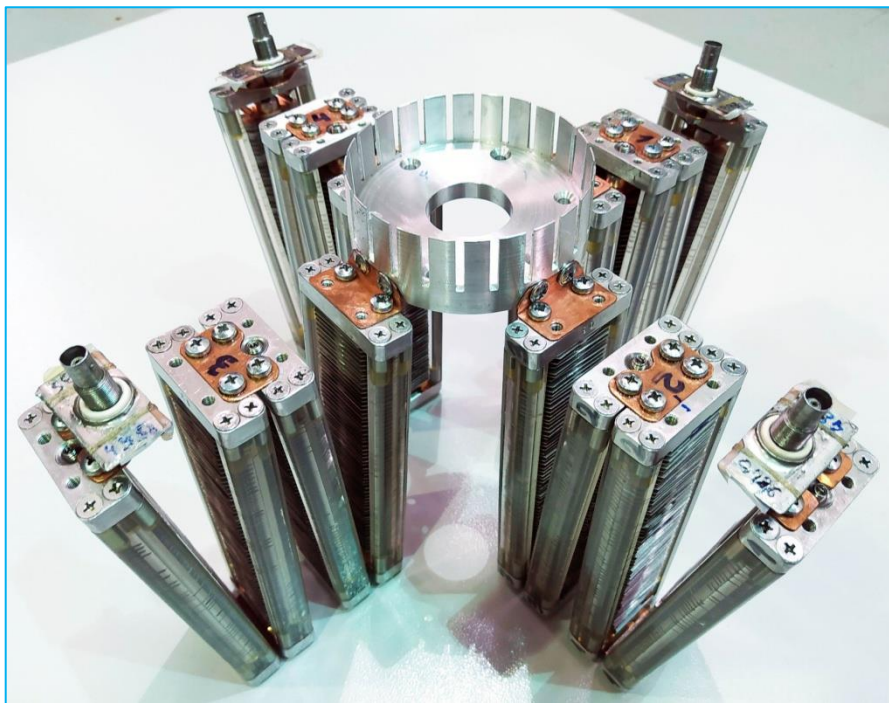
Обрываемый ток	~14 kA
Время обрыва	~2 ns
$(di/dt)_{\max}$	~7 kA/ns

Электрическая схема генератора S-500: 1 – элементы зарядного устройства DFL, 2 – Блок DFL–SOS, 3 – линия передачи с ферритовым обострителем FS и нагрузкой R

Выходной узел генератора S-500

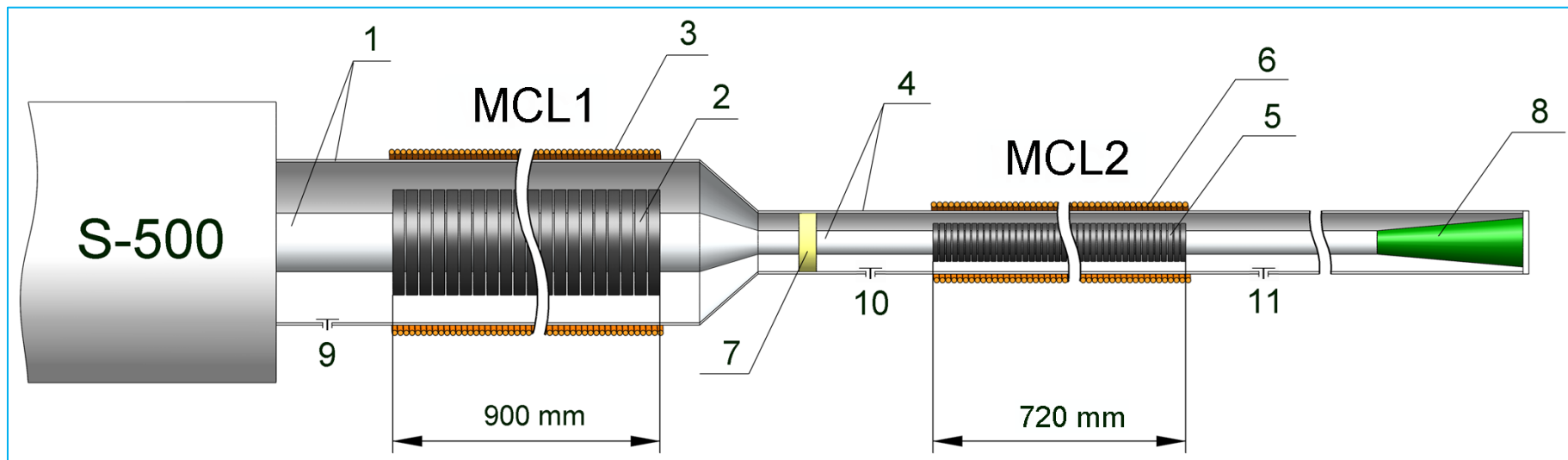


Узел с SOS (a), SOS-диод (b), и элементарный SOS-диод (c). Общее количество диодных структур – 3648 шт.



Обратный ток через каждую ветвь ключа

Двухступенчатая система компрессии

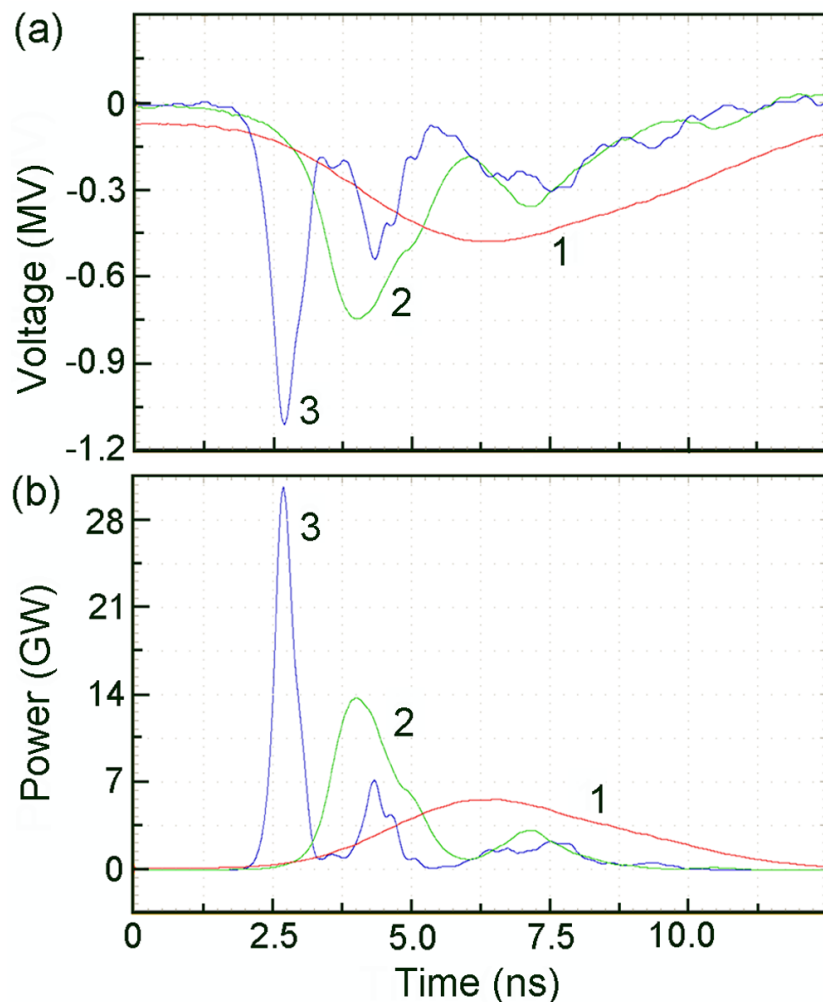


MCL (Magnetic Compression Line) – Линия магнитной компрессии ($t_p \sim T_{osc}$)

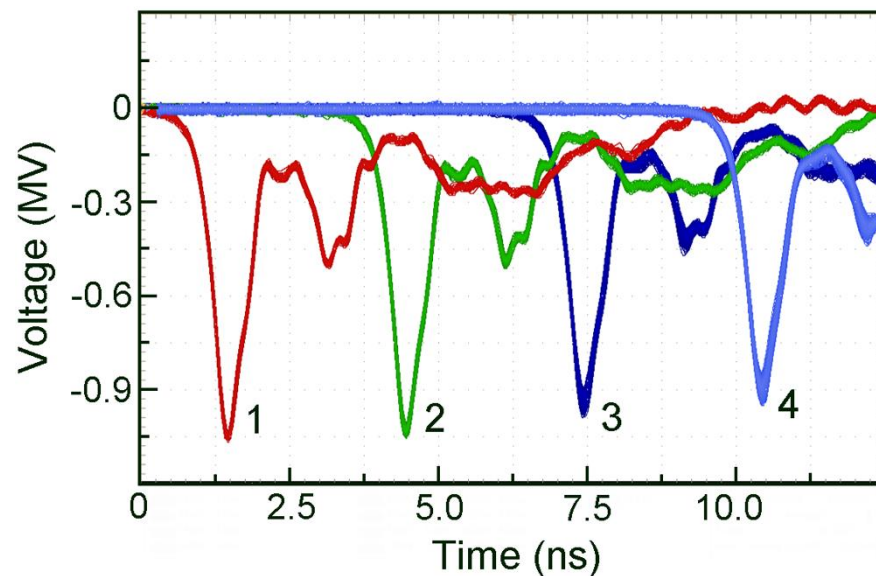
Параметры системы компрессии. D и d – диаметры наружного (D) и внутреннего (d) проводника линии, ρ – волновое сопротивление линии, рассчитанное при $\epsilon_{oil} = 2.25$, D_f и d_f – наружный (D_f) и внутренний (d_f) диаметры ферритовых колец, ΔH_Z – диапазон изменения смещения магнитного поля в соленоиде.

Parameter	D (mm)	d (mm)	ρ (Ω)	D_f (mm)	d_f (mm)	ΔH_Z (kA/m)
MCL1	275	102	39.7	180	110	0–40
MCL2	101	37	40.2	65	40	0–90

Двухступенчатая система компрессии



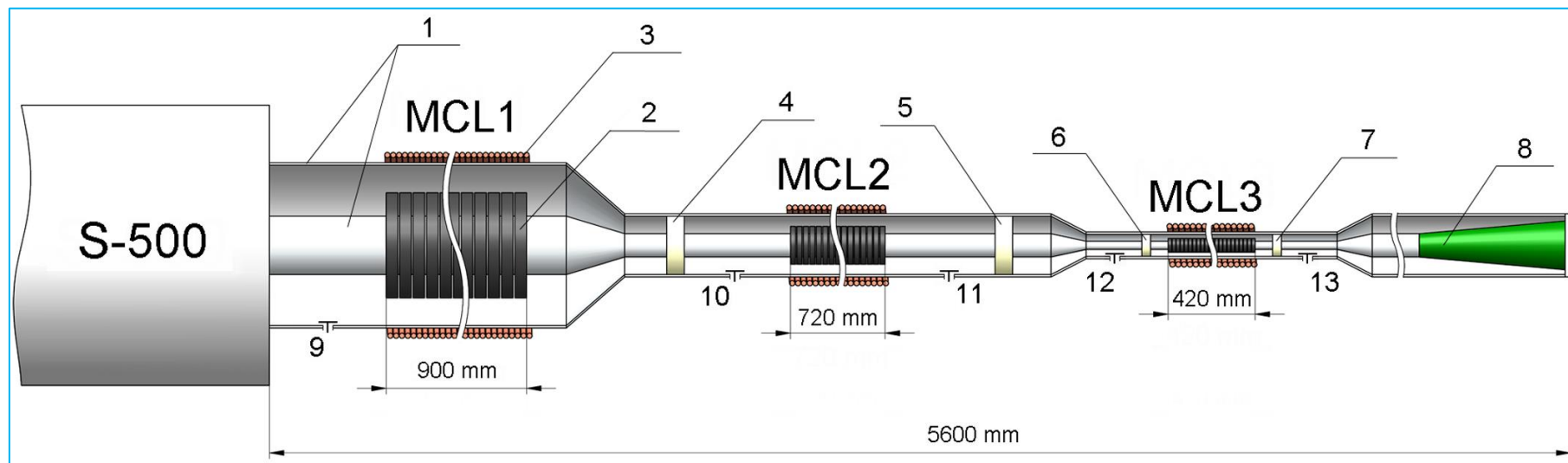
Осциллограммы напряжения (а) и мощности (б) входных импульсов (1), импульсов после линии MCL1 (2) и импульсов после линии MCL2 (3) полученные при оптимальных значениях n и N в обеих линиях.



Осциллограммы импульса напряжения после линии MCL2, в режиме пачки импульсов (накопление 100 импульсов): Частота 100 Hz (1); 300 Hz (2); 600 Hz (3); и 1 kHz (4).

Импульс	V^m (MV)	P^m (GW)	t_p (ns)	W (J)
Входной	0.5	6.2	7.0	33
После MCL1	0.74	13.6	2.2	22
После MCL2	1.12	31.4	0.65	14.8

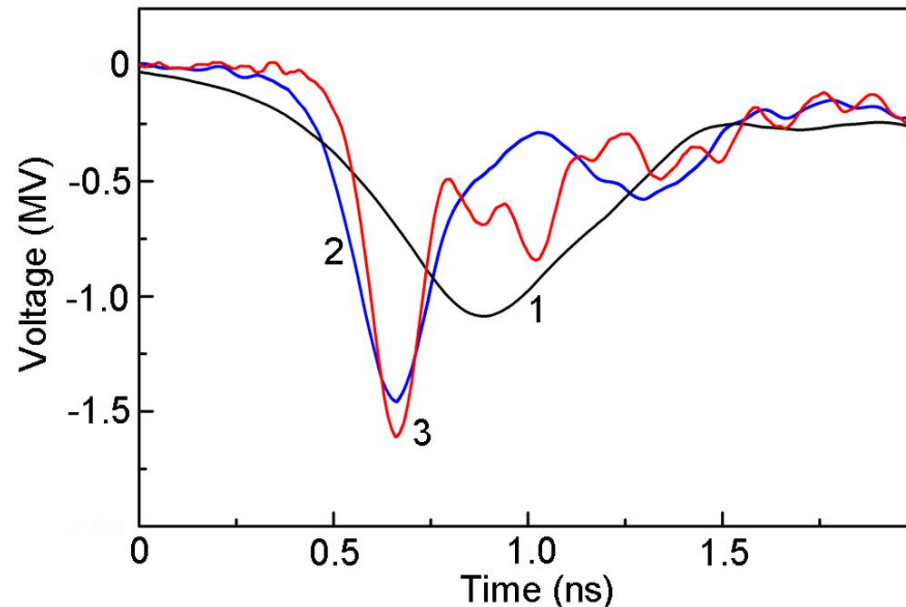
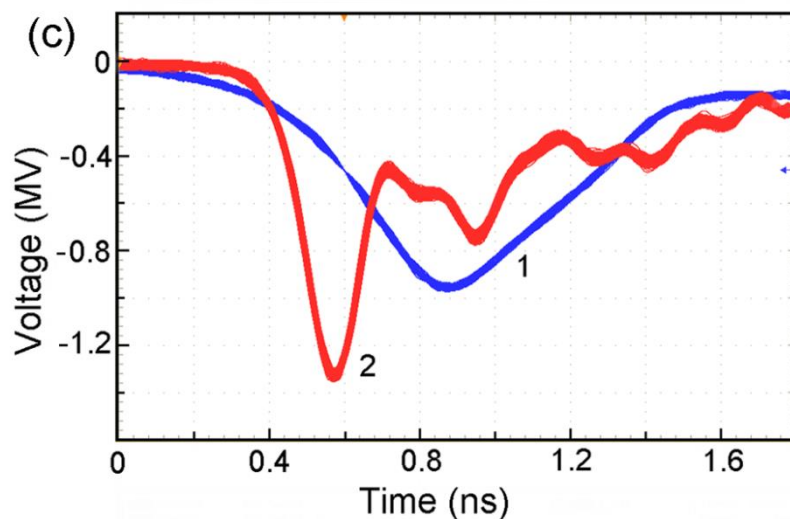
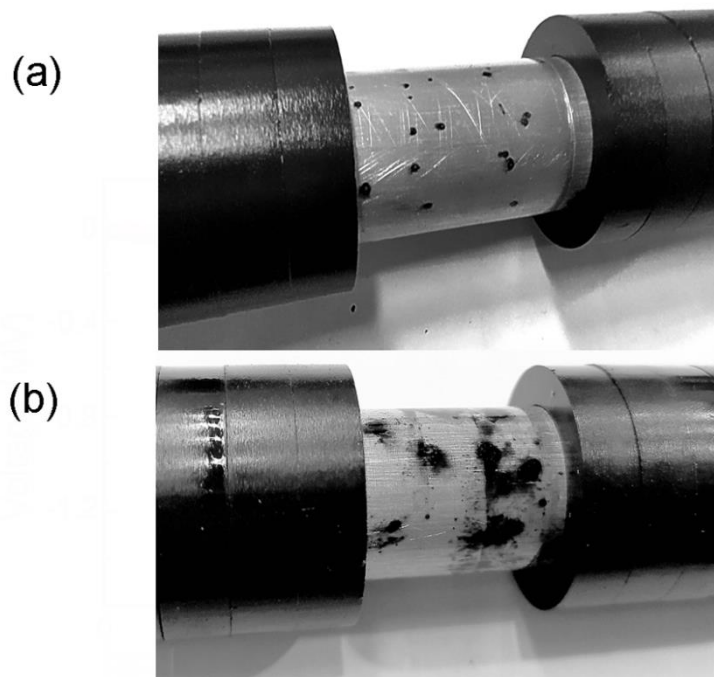
Трехступенчатая система компрессии



Параметры импульсов в трехступенчатом компрессоре

	V^m (MV)	P^m (GW)	$FWHM$ (ns)	$(dV/dt)^m$ (MV/ns)	$(dP/dt)^m$ (GW/ns)
S-500	0.5	6.0	7.0	0.11	2
MCL1	0.74	13.6	2.2	0.58	21
MCL2	1.12	31.4	0.65	2.8	110
MCL3_50	1.48	45.3	0.25	9.7	463
MCL3_38	1.62	54.6	0.17	14.8	715

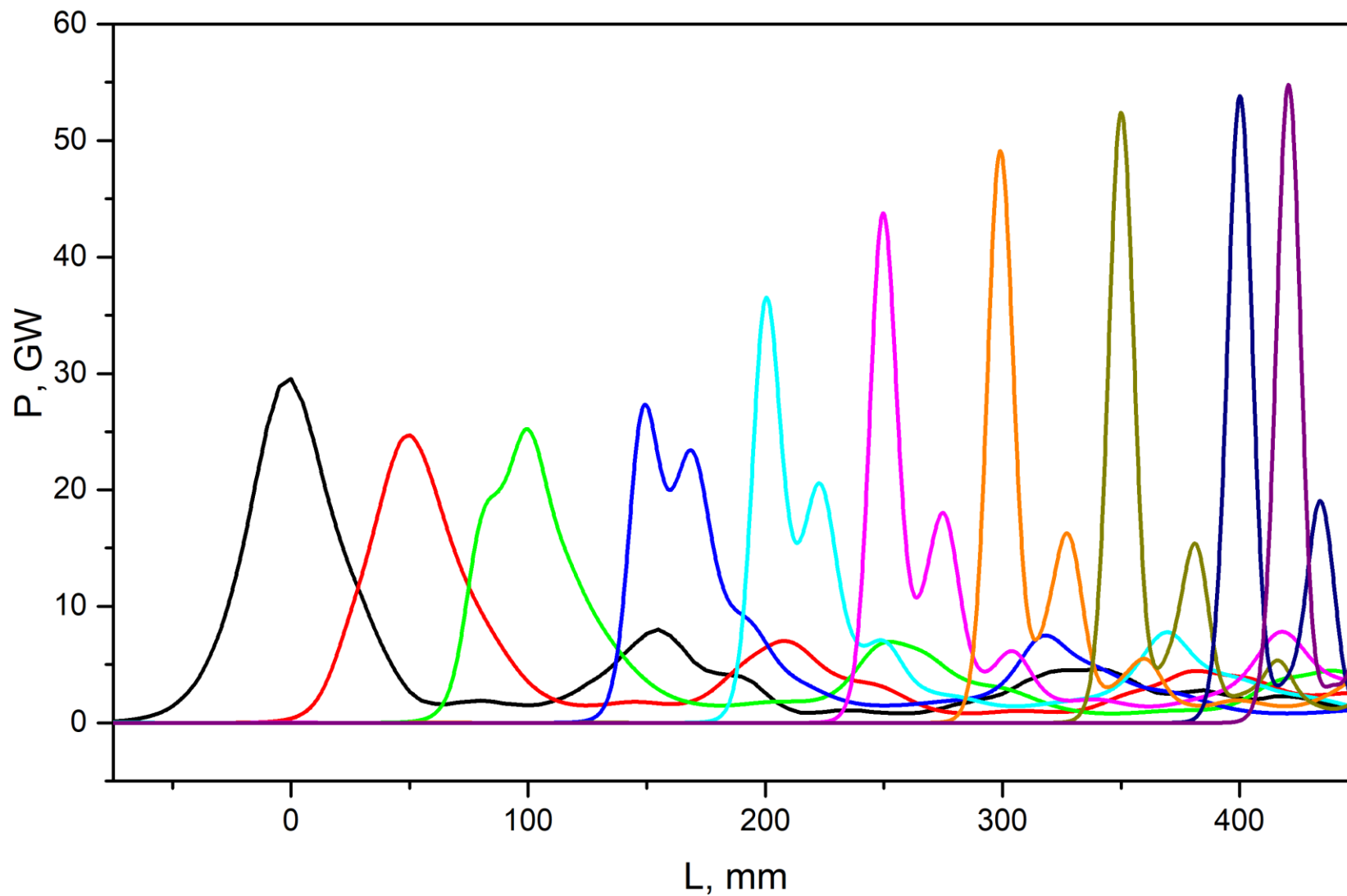
Трехступенчатая система компрессии



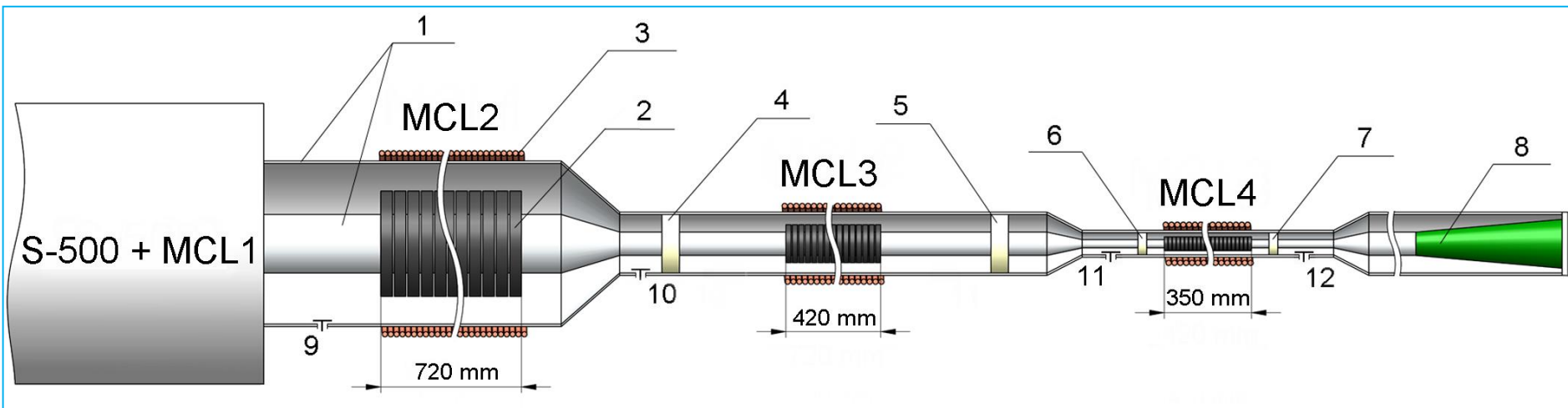
Осциллограммы входного импульса линии MCL3 (1), выходного импульса после 50-мм линии (2) и после 38-мм линии (3) при оптимальных значениях n и H в обеих линиях.

Поверхность внутреннего проводника в конце 38-мм линии MCL3 после 50 импульсов в однократном режиме (а) и после 1200 импульсов в частотном режиме (частота 300 Hz, пачка 4 с) (б); (с) суперпозиция 1200 импульсов в 4 с - пачке при частоте 300 Hz для 38-мм линии MCL3: 1 – входной импульс, 2 – выходной импульс.

Процесс усиления мощности импульса в MCL3



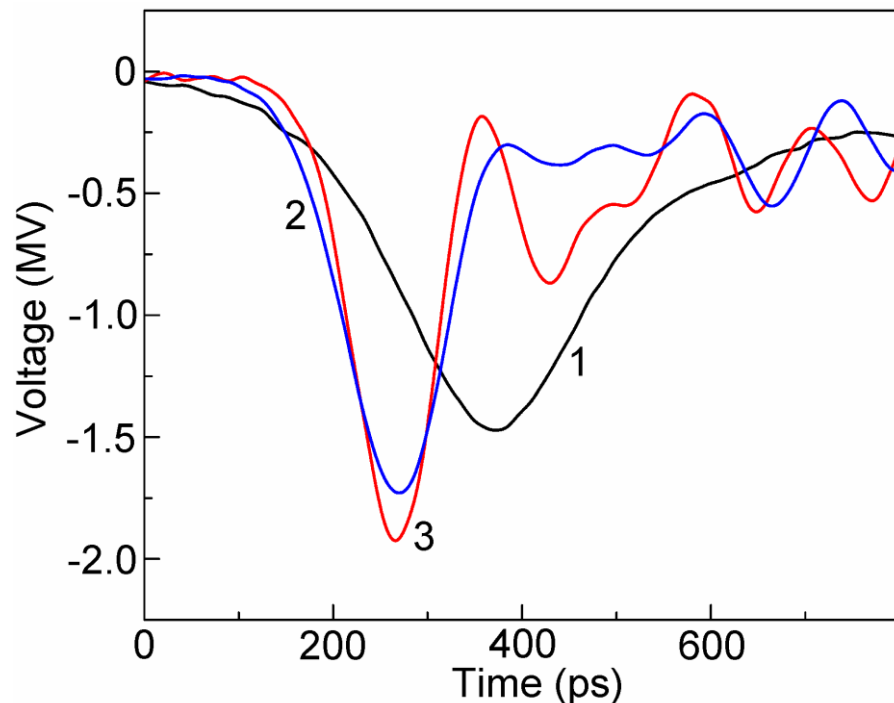
Четырехступенчатая система компрессии



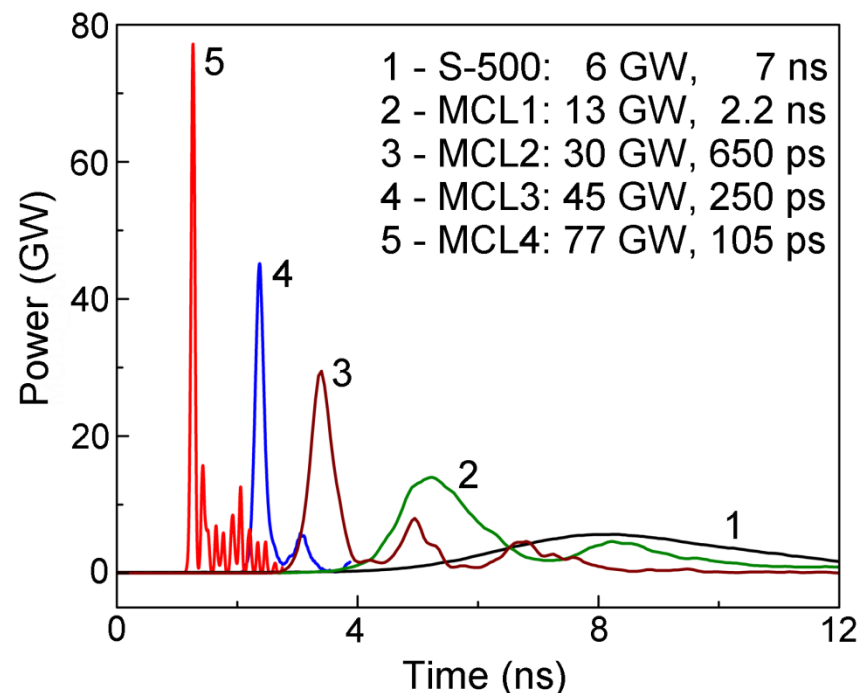
Параметры импульсов в четырехступенчатом компрессоре

	V^m (MV)	P^m (GW)	$FWHM$ (ps)	$(dV/dt)^m$ (MV/ns)	$(dP/dt)^m$ (TW/ns)
Input pulse	1.48	45.3	250	9.7	0.46
MCL4_26	1.74	63.0	130	23.3	1.16
MCL4_22	1.93	77.3	105	26.2	1.65

Четырехступенчатая система компрессии



Осциллограммы входного импульса на линию MCL4 (1), выходного импульса после 26-мм линии (2) и после 22-мм линии (3) при длине ферритового заполнения 350 мм.

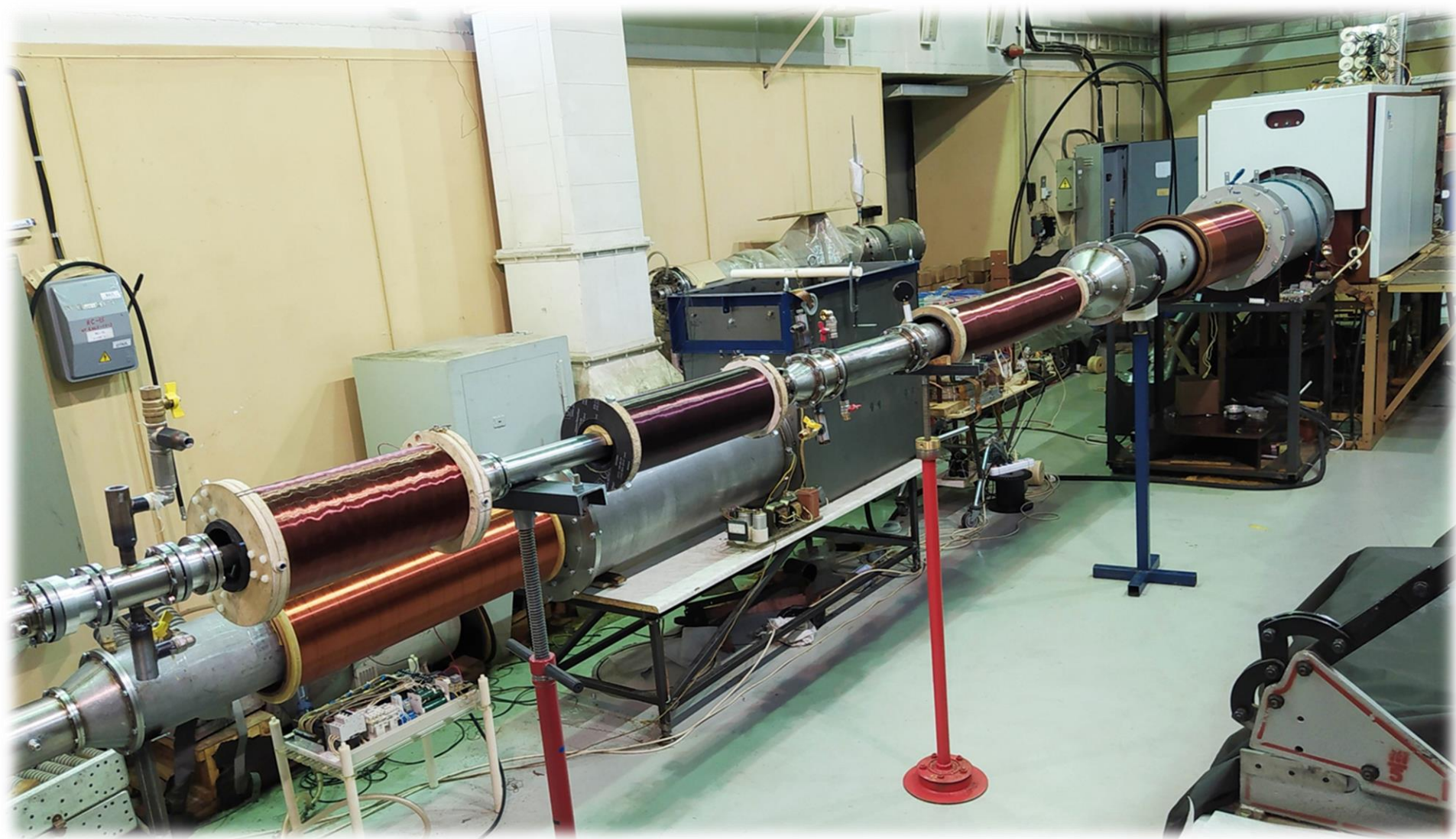


Процесс сжатия энергии во всей системе: Осциллограммы мощности входного импульса (1), после линии MCL1 (2), после линии MCL2 (3), после 50-мм линии MCL3 (4), после 22-мм линии MCL4 (5)

Изменения параметров входного импульса после четырехступенчатого сжатия

Parameter	V_{max}	P_{max}	$FWHM$	$(dV/dt)_{max}$	$(dP/dt)_{max}$
Change (in times)	$\uparrow \sim 3.8$	$\uparrow \sim 13$	$\downarrow \sim 65$	$\uparrow \sim 230$	$\uparrow \sim 820$

Внешний вид установки



Заключение

- Показана возможность создания пикосекундных твердотельных генераторов с пиковой мощностью в десятки ГВт. В предлагаемом подходе входной импульс наносекундной длительности от твердотельного генератора SOS усиливается по мощности и уменьшается по длительности четырехступенчатым магнитным компрессором на ферритовых гиромагнитных линиях.
- При данном подходе линия каждой ступени работает в режиме линии магнитной компрессии (MCL), который реализуется при близких значениях длительности входного импульса и периода колебаний, генерируемых в линии.
- Наиболее важной особенностью подхода является то, что в системе сжатия импульсов не требуется ни замыкающих, ни размыкающих коммутационных элементов. Усиление импульса по мощности и его сжатие во времени происходят автоматически при прохождении импульса по линии.
- Для импульсных генераторов достигнуто рекордно высокое значение скорости нарастания напряжения 26 МВ/нс.
- Для твердотельных импульсных систем достигнуты рекордно высокие значения пиковой мощности (77 ГВт) и скорости ее нарастания (1,6 ТВт/нс).

Спасибо за
внимание



Российская Академия наук
Институт электрофизики
Лаборатория импульсной техники

Генерирование мультигигаваттных субнаносекундных импульсов гироманнитными линиями

М.С. Педос, С.Н. Рукин, С.П. Тимошенко,
Е.А. Аличкин

22-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург
2021