

Мощная нано-пикосекундная техника

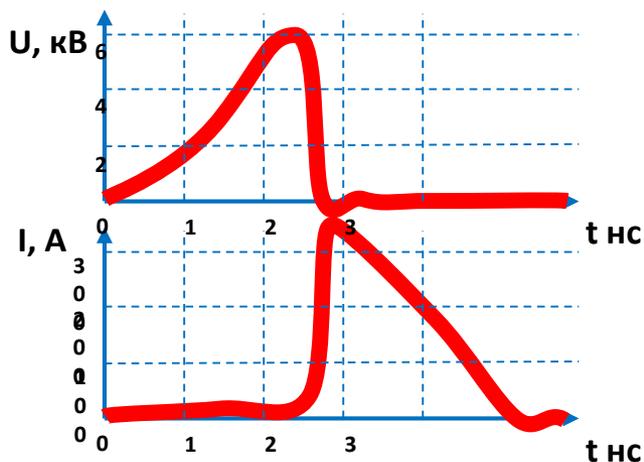
Достижения и перспективы

Ефанов Владимир Михайлович
2026

Основополагающие работы ФТИ им. Иоффе в нано-пикосекундной технологии

Эффект субнаносекундного переключения диодной структуры через механизм распространения ударно-ионизационной волны.

Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. 1979



Эффект резкого восстановления высоковольтного p-n перехода.

Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В., 1983

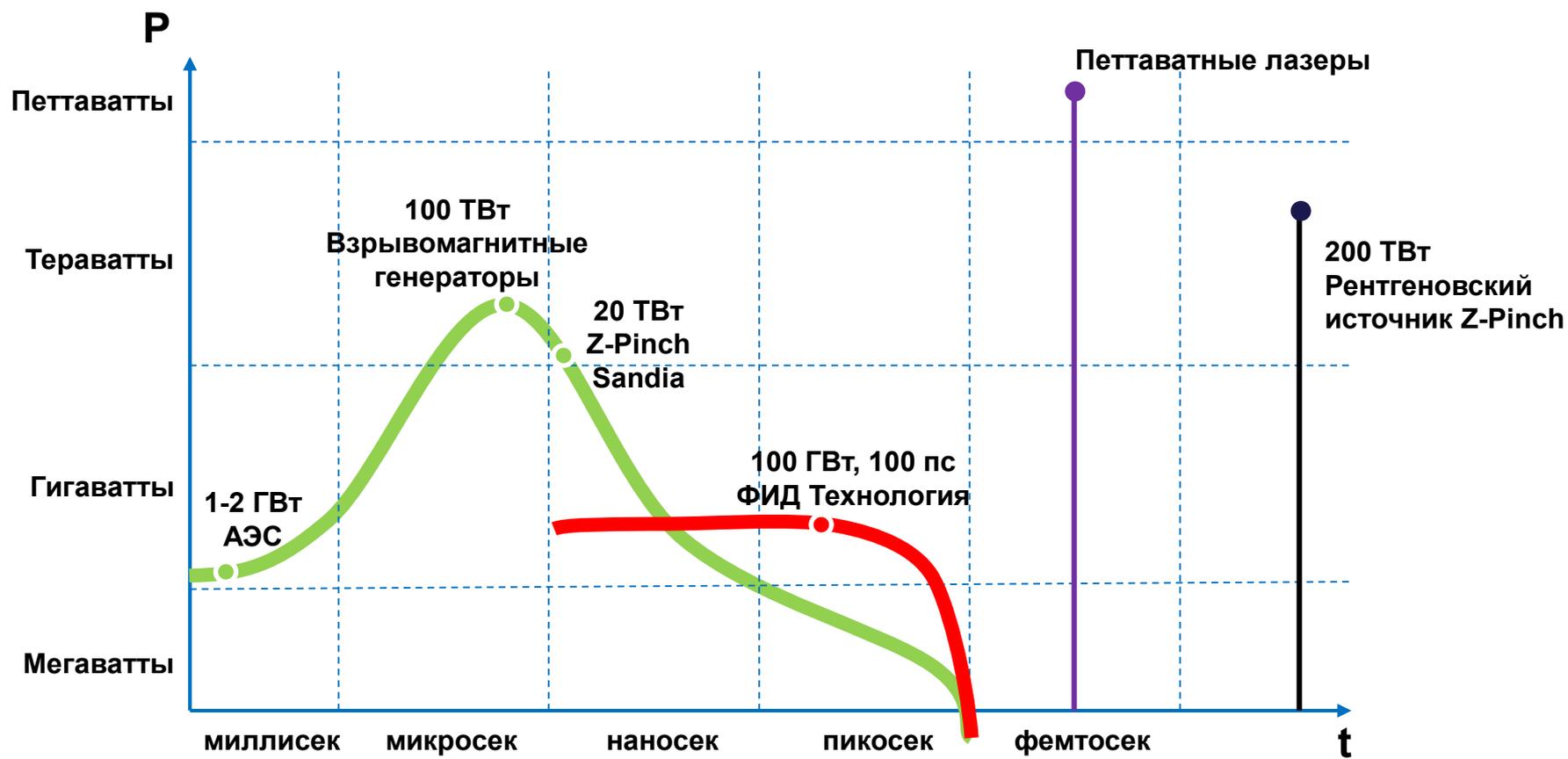


Пиковый ток 250 А

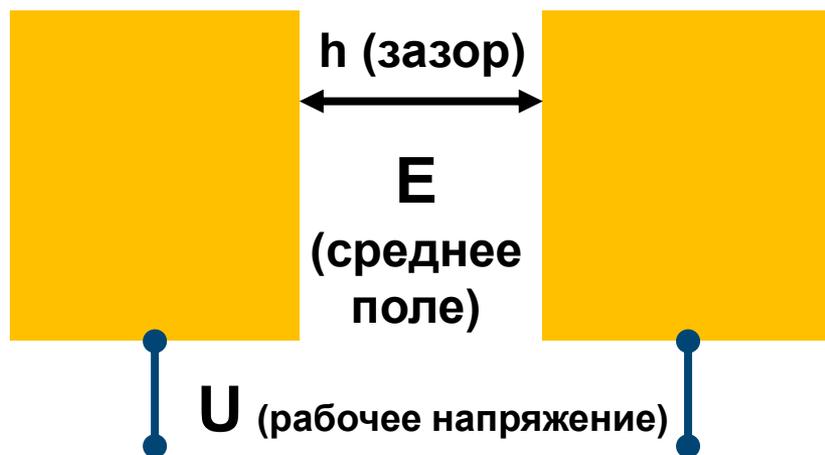
Пиковое напряжение 10 кВ

Measurements	Scales
Y: p-p(1)	
Current	1.958 V
Mean	1.9207 V
Min	1.897 V
Max	1.958 V

Максимально достигнутые пиковые мощности в различных спектральных диапазонах



Фундаментальные ограничения на максимальную коммутируемую мощность единственным ключом



$$\tau_{\text{переключ}} = \frac{h}{V}$$

$$U_{\text{рабочее}} = E \cdot h$$

Полупроводники (кремний)

$$E_{\text{max}} = 2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$$

$$V_{\text{max}} = 10^5 - 10^7 \text{ см/с}$$

Новые материалы (SiC, GaN)

$$E_{\text{max}} \approx 1-2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$$

$$V_{\text{max}} = 10^5 - 10^7 \text{ см/с}$$

Ударно-ионизационная волна

$$E_{\text{max}} \approx 10^5 - 10^7 \text{ В/см}$$

$$V_{\text{max}} \approx 10^6 - 10^{10} \text{ см/с}$$

Пути повышения пиковых мощностей нано- и пикосекундных генераторов

- Повышение пиковой мощности единичных ключей
- Суммирование пиковой мощности при параллельно-последовательном включении многих ключей
- Суммирование пиковой мощности от многих генераторов на распределенной нагрузке
- Поиск новых физических принципов формирования импульсов напряжения

Элементная база генераторов нано- и пикосекундного диапазона

- Газовые разрядники
- Газоразрядные тиратроны
- Мощные полупроводниковые ключи
 - IGBT транзисторы
 - MOSFET транзисторы
 - Мощные тиристоры
 - РВД ключи, SOS ключи
 - GaN транзисторы
 - SiC транзисторы
- Твердотельные ключи на новых физических принципах
 - FID ключи
 - DRD ключи

Фундаментальные ограничения на суммирование пиковой мощности

- **Временная нестабильность переключения мощных ключей (джиттер)**
 - Полупроводниковые ключи
(транзисторы, тиристоры, и т.д.) **5-10 пс**
 - Газовые разрядники **1-10 нс**
 - Тиратроны **0,5-5 нс**
 - DRD, FID ключи **5-10 пс**
- **Массогабаритные ограничения**
- **Возможное количество параллельно-последовательных подключений единичных приборов**

Направления разработок

Пиковая мощность более 100 ГВт
Длительность 100-500 пс



Многоканальные импульсные системы

Пиковая мощность 1-100 ГВт
Длительность 10-1000 нс



**Плазмохимия, газовые лазеры,
ускорители**

Пиковая мощность до 0,1-100 МВт
Частота – до 100 МГц



Высокочастотные генераторы

Макс. Напряжение до 20 кВ
Длительность 0,1 – 100 нс



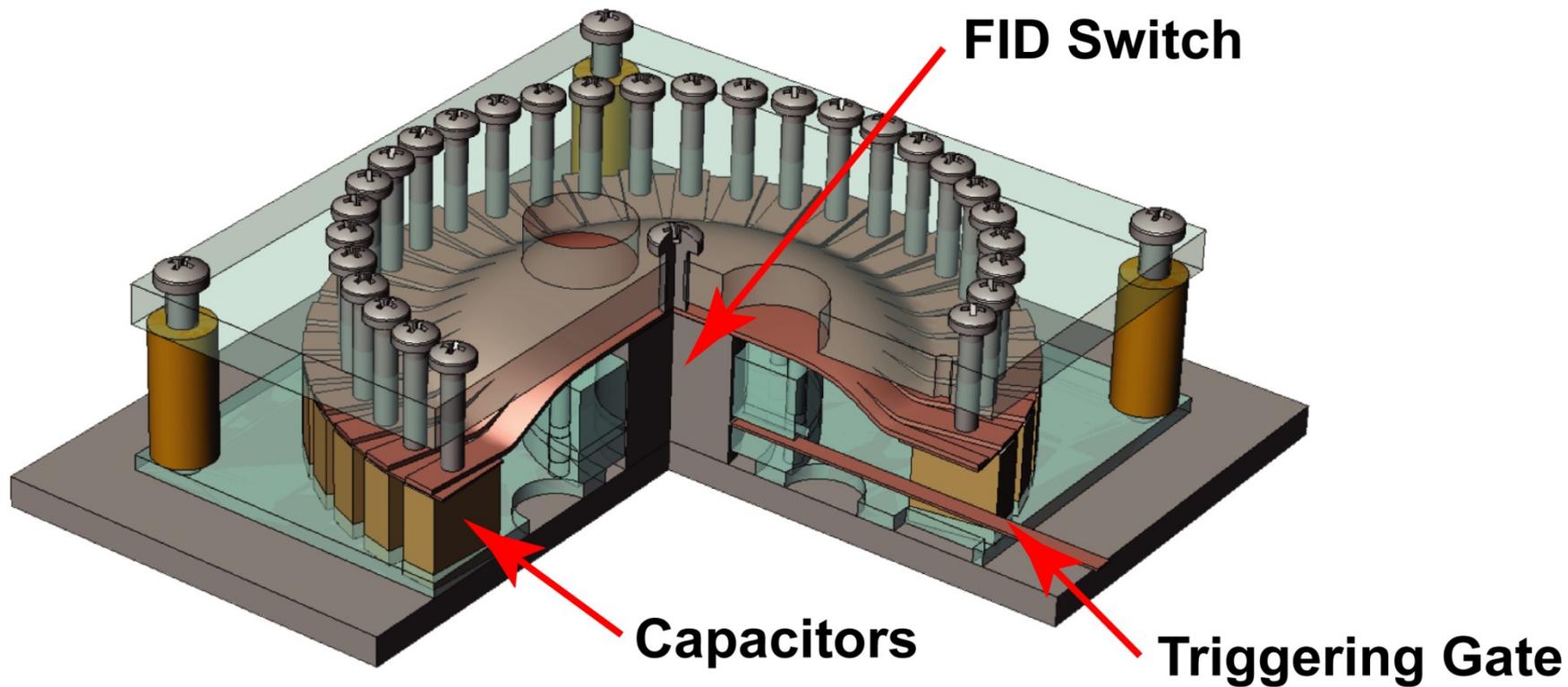
Оптические затворы, лазерные диоды

Рабочее напряжение до 100 кВ
Пиковый ток до 100 кА

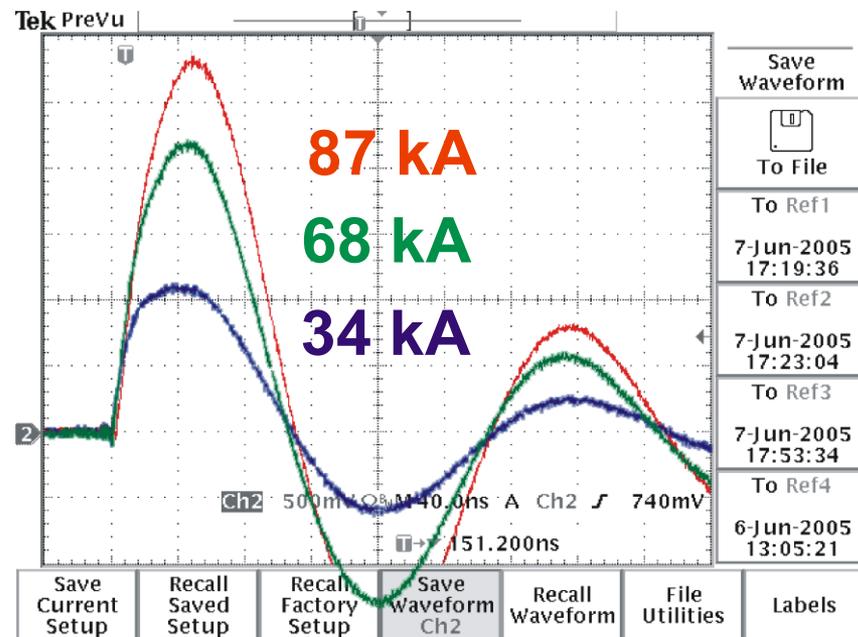
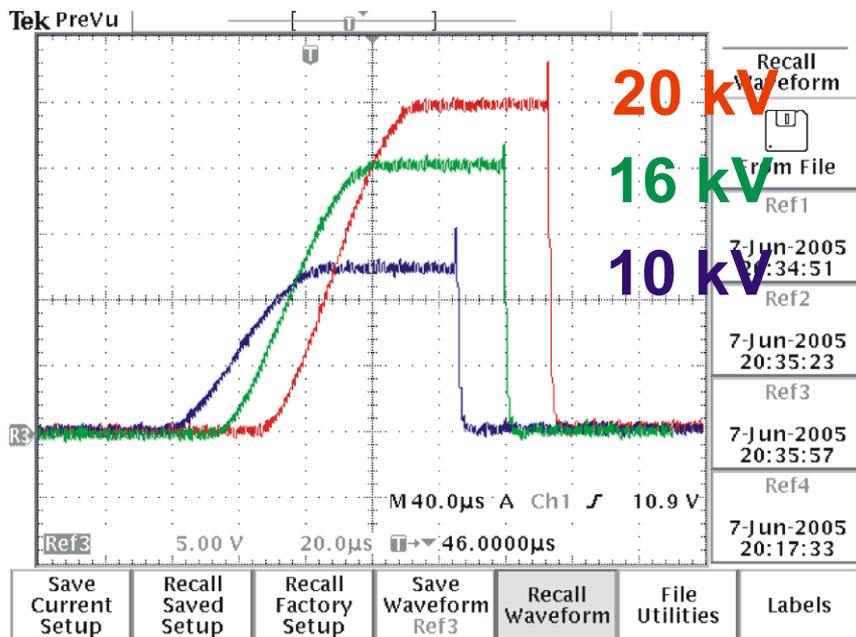


**Твердотельные ФИД ключи,
замена тиратронов**

Низкоиндуктивный тестовый стенд



Результаты тестирования 20 кВ ФИД ключа



Твердотельные FID и DRD ключи



Основные технологии, формирующие рынок нано- пикосекундной техники

- Ускорительная техника
- Плазмохимия
- Мощные лазеры
- СШП излучающие системы
- Медицина
- Системы защищенной связи
- Фундаментальная физика
- Энергетика

300 кВ модули для мощных газовых лазеров

Максимальная амплитуда – 200 -300 кВ

Пиковый ток – 5-20 кА

Длительность импульсов –100-500 нс

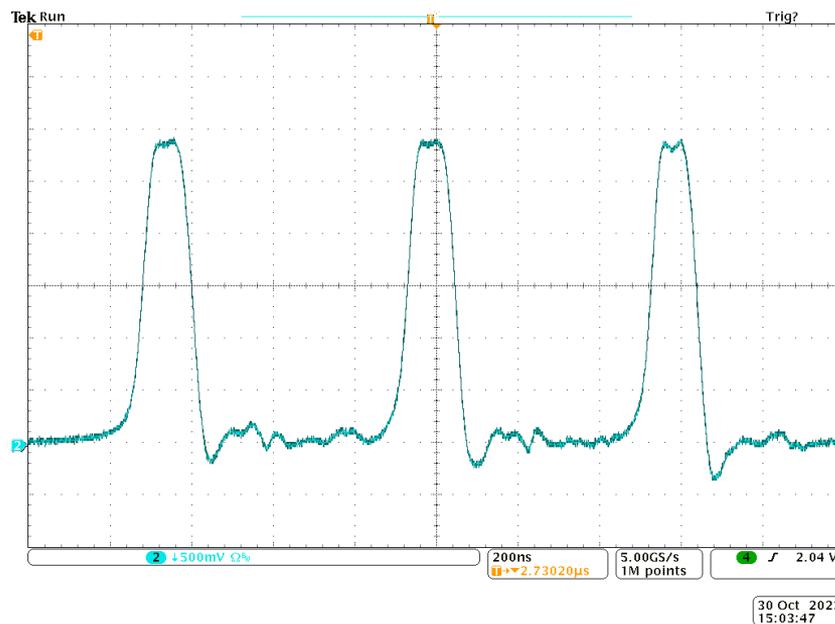
Энергия в импульсе – 50-500 Дж

Максимальная частота – 10-100 Гц

Габариты – 1200x300x150 мм



Импульсные генераторы системы питания линейных ускорителей



Нагрузка – индуктор с импедансом 2 Ом
Максимальная амплитуда – 25 кВ
Пиковый ток – 12 кА
Пиковая мощность – 300 МВт
Длительность импульсов – 50 нс

4х канальный генератор 50 кВ

Максимальная амплитуда – 50 кВ

Фронт нарастания – 2 нс

Длительность импульсов – 3, 7 и 13 нс

Максимальная частота – 100 кГц

Средняя мощность – 5 кВт

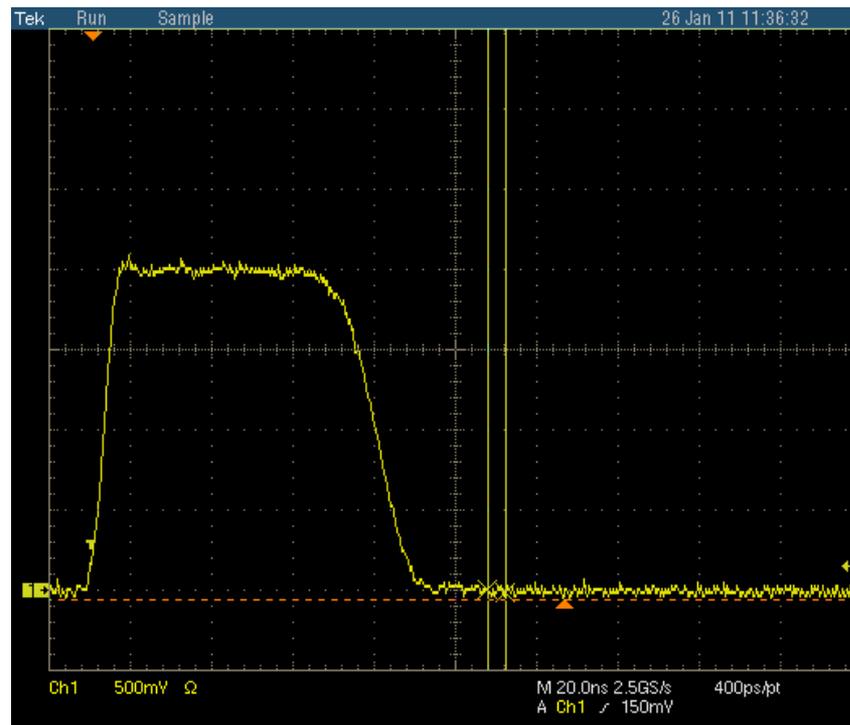
Выдерживает режимы Х.Х. и К.З



Высоковольтный генератор для кикеров ускорителей



Амплитуда 50 кВ @ 50 Ом
Пиковая мощность 50 МВт
Частота повторения 100 Hz



Время нарастаний 10 нс
Ширина импульса 50 нс

Пикосекундные 100 кВ модули

Максимальная амплитуда на 50 Ом – 100 кВ

Фронт нарастания – 60-70 пс

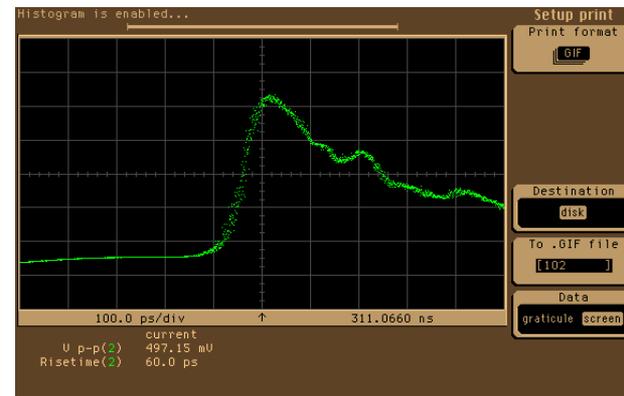
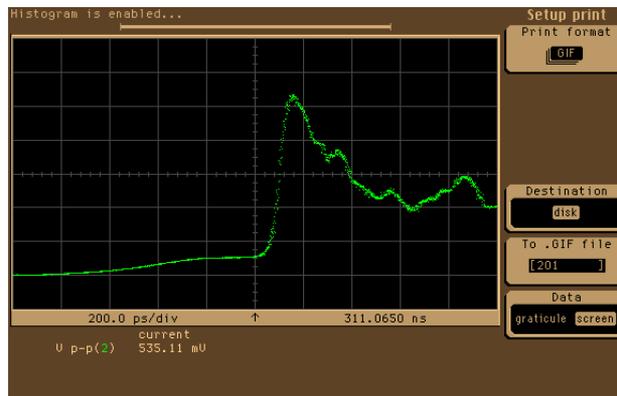
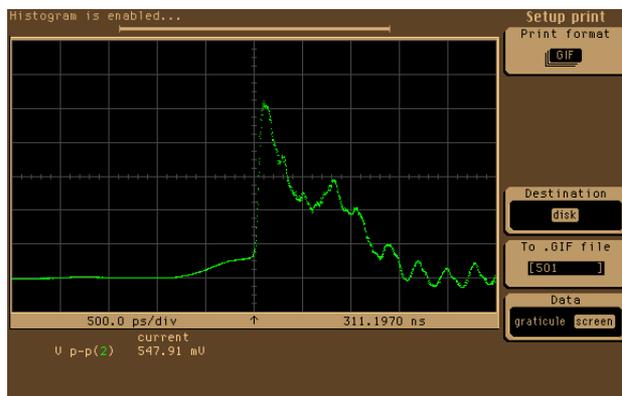
Длительность – 0,5 нс

Максимальная частота – 1 кГц

Джиттер (RMS) – меньше 20 пс

Входная мощность (1 кГц) – 250 Вт

Вес – 3 кг



100 кВ и 200 кВ пикосекундные модули

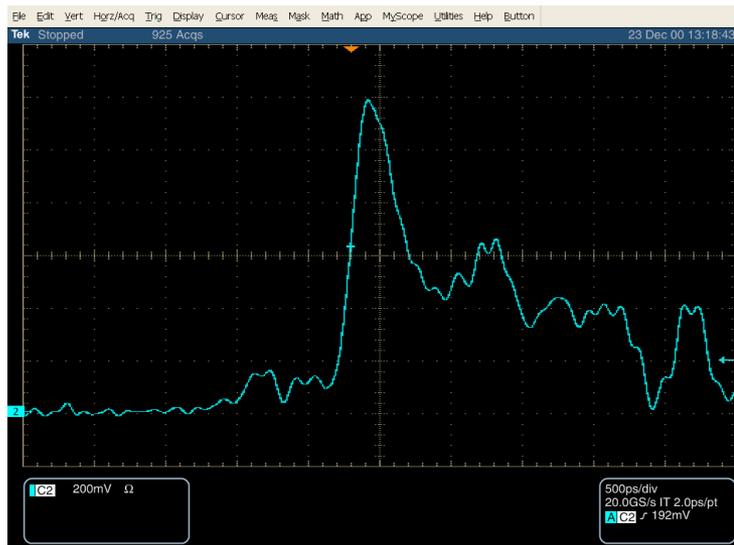
Максимальная амплитуда на 50 Ом – 100 -200 кВ

Фронт нарастания – 70-120 пс

Длительность – 0,5-1 нс

Максимальная частота – 1 кГц

Джиттер (RMS) – меньше 20 пс



Многоканальные пикосекундные импульсные системы

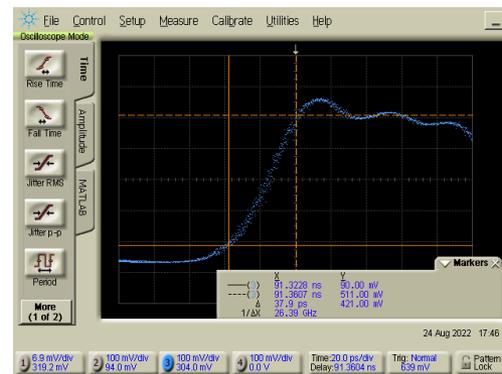


Пиковая мощность – 1-100 ГВт
Длительность импульсов – 200-500 пс
Максимальные частоты – 1-100 кГц

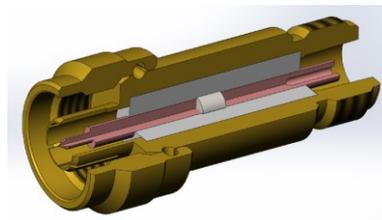
Сверхстабильный генератор пикосекундных импульсов мегаваттной пиковой мощности



Амплитуда выходного импульса 25 кВ
Фронт нарастания 25-30 пс
Нагрузка 50 Ом
Макс. частота повторения 1 кГц

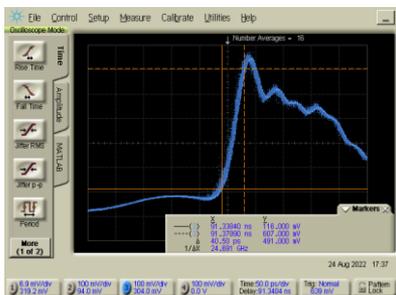


Фронт нарастания 25-30 пс
Измерена выходная амплитуда 20 кВ



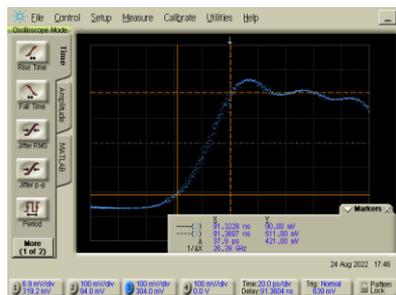
Волновой обостритель с ФИД ключом

Измерения пикосекундных импульсов напряжения мегаваттной мощности



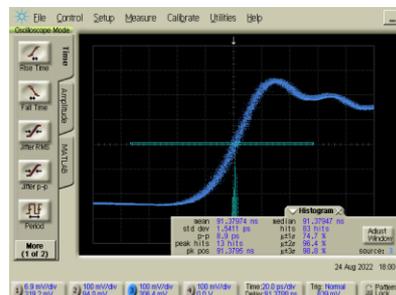
Амплитуда – 25 кВ
Фронт – 40.5 пс
Частота – 1 кГц

Средства регистрации – высоковольтные аттенюаторы производства ФИД Технологии и Barth Electronics



Амплитуда – 20 кВ
Фронт – 38 пс
Частота – 1 кГц

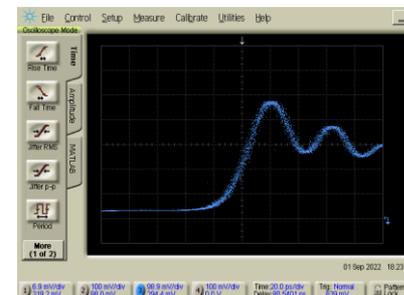
Средства регистрации – высоковольтные аттенюаторы производства ФИД Технологии и Barth Electronics



Амплитуда – 20 кВ
Фронт – 38 пс
Частота – 1 кГц

Джиттер: 1.5 пс RMS
9 пс peak-to-peak

Средства регистрации – высоковольтные аттенюаторы производства ФИД Технологии и Barth Electronics

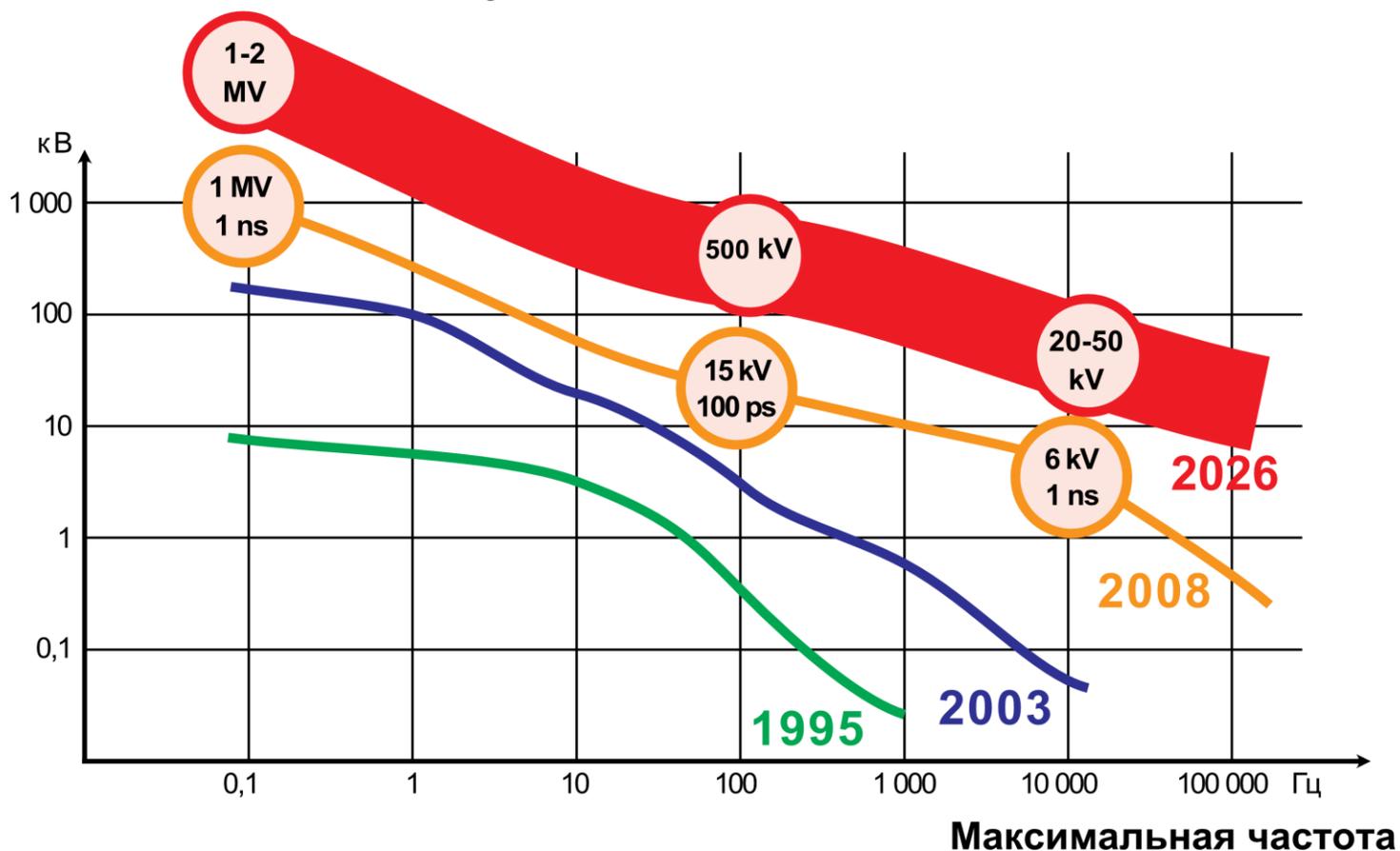


Амплитуда – 20 кВ
Фронт – 25 пс
Частота – 1 кГц

Средства регистрации – емкостной датчик производства ФИД Технологии

Достижимый уровень пикосекундных генераторов на основе ФИД Технологии

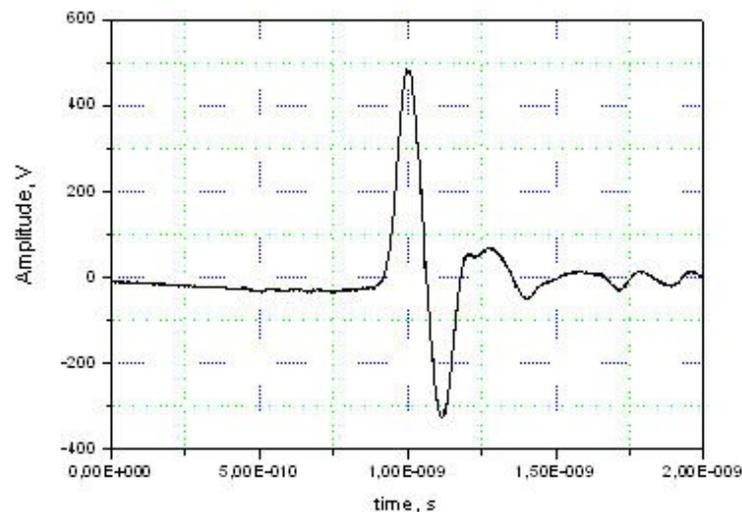
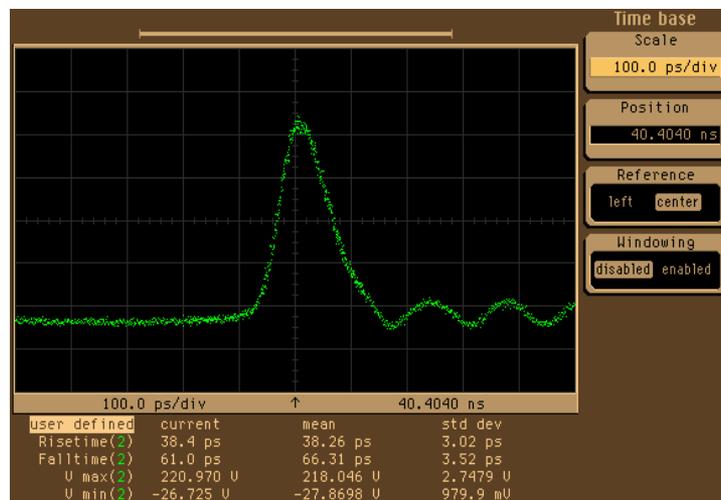
Максимальная амплитуда



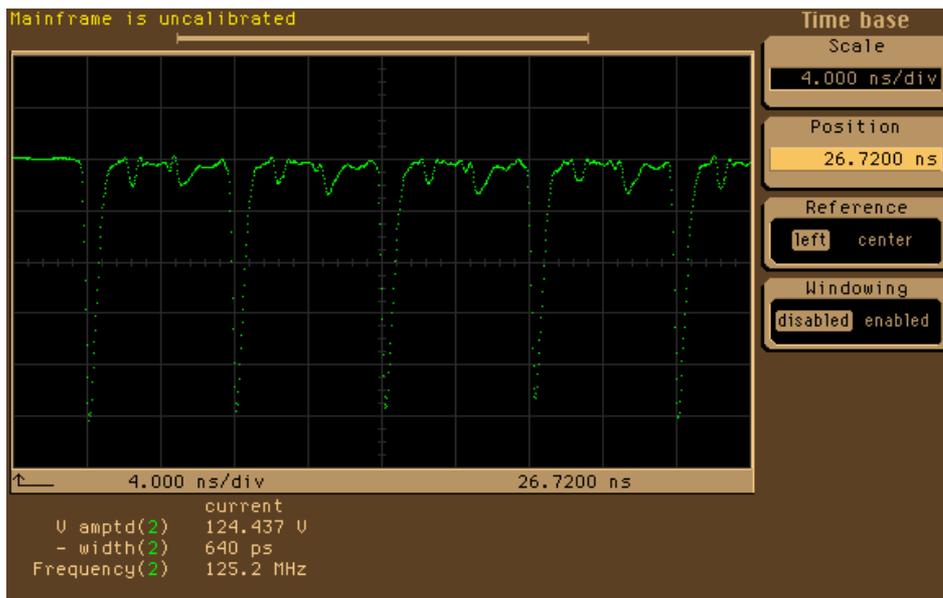
Высокочастотные пикосекундные модули



Амплитуда на 50 Ом – 0,1 -1 кВ
Фронт нарастания – 40-100 пс
Длительность – 0,1-1 нс
Максимальная частота – 0,1-10 МГц
Джиттер (RMS) – меньше 5-10 пс

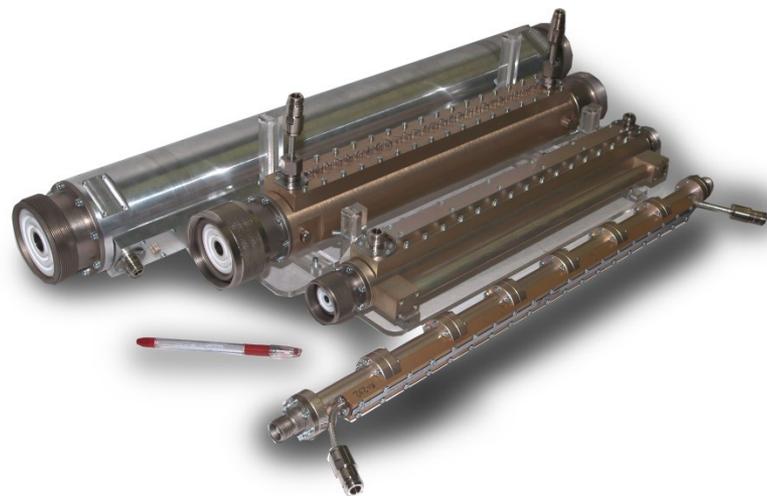


Пикосекундный генератор 125 МГц

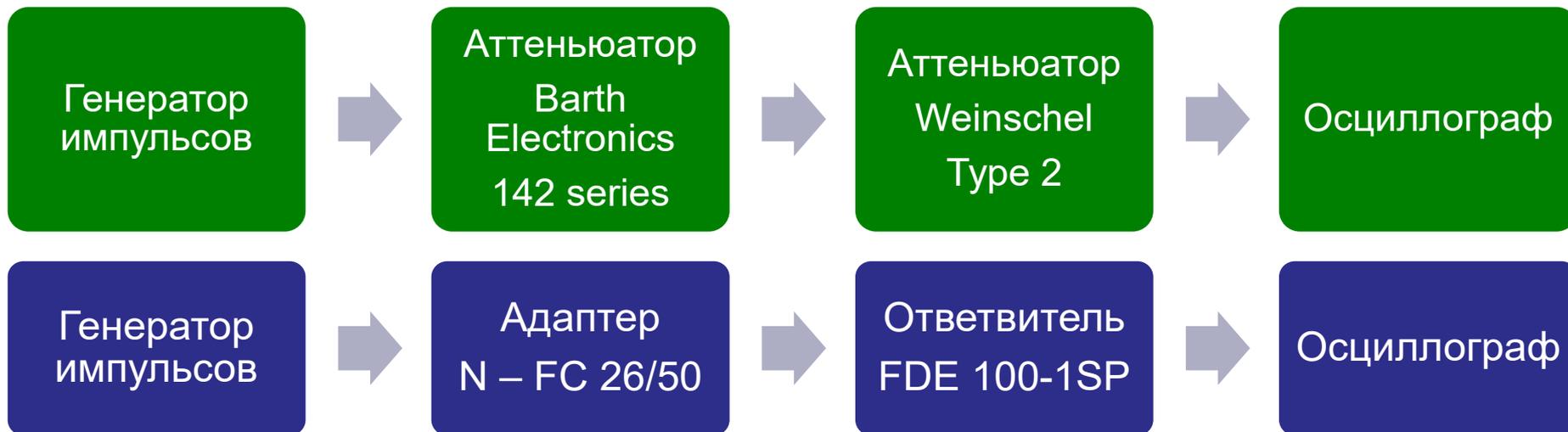


Амплитуда на 50 Ом – 400 V
Длительность – 640 пс
Частота - 125 МГц в пакете

Высоковольтные аттенюаторы, ответвители, разъемы и адапторы



Калибровка ответвителя FDE 100-1SP с временным разрешением 40-50 пс



Перспективы увеличения пиковой мощности нано- и пикосекундных генераторов

