Исследование электровзрыва тонких плоских фольг наносекундным импульсом тока

И. Н. Тиликин, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз,
А. Р. Мингалеев, В. М. Романова

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия*

В работе исследовался взрыв тонких плоских фольг сильноточным электрическим импульсом при различных условиях эксперимента. Использовались генераторы с током от 8 до 1000 кА, напряжением от 20 до 600 кВ и длительностью фронтах импульса от 350 до 100 нс. Исследовались фольги из алюминия, никеля, меди и титана толщиной от 1 до 100 мкм с использованием комплекса диагностик в оптическом, УФ и рентгеновском диапазонах. В экспериментах показано, что взрыв фольги - сложный процесс, зависящий от множества факторов, включающих в себя как свойства материала фольги, так и параметры генератора тока. При этом обнаружен и ряд общих закономерностей, наблюдаемых в очень широком диапазоне начальных условий. Эксперименты показали, что при использовании плоских фольг с квази-периодической собственной структурой введенная в фольгу энергия зависит от взаимной ориентации структуры фольги и направления тока через нее. При наличии у фольги собственной одномерной структуры нанесение искусственного профиля в виде канавок, перпендикулярных ей и параллельных направлению тока, приводит к замедлению развития неустойчивостей на 15–35%. Из этого можно сделать вывод, что нанесение на фольгу поперечных искусственных структур должно приводить к замедлению роста неустойчивостей в лайнерах любой конфигурации.

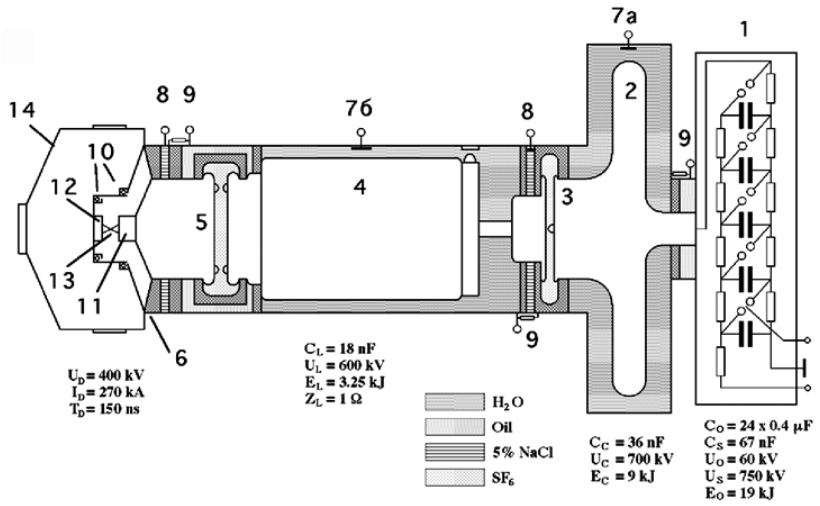
Экспериментальные работы по взрыву тонких Al-фольг демонстрируют возможность использования излучения с поверхности фольги в качестве источника УФ излучения. Нанесение на фольгу периодической структуры с шагом 400 мкм позволило создать однородный источник УФ диапазона большого размера (4×20 мм) и сохраняющего однородность излучения со всей площади в течении времени от 20 до 70 нс. Интенсивность излучения взорванной плоской фольги достаточна для использования регистрирующей аппаратуры с временным разрешением, например, камеры с микроканальной пластиной, дающей временное разрешение 5 нс. Применение источника УФ-излучения на основе взорванной модифицированной фольги будет особенно актуально для изображения плазменных объектов низкой плотности.

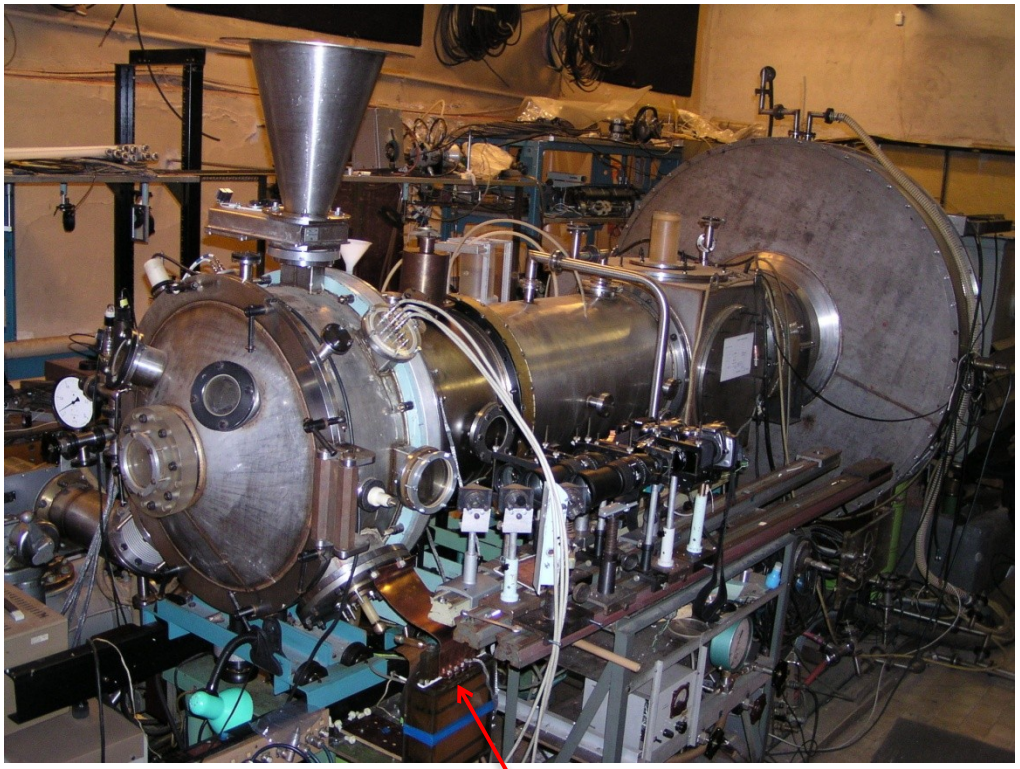
Работа поддержана грантом РНФ 19-79-30086.

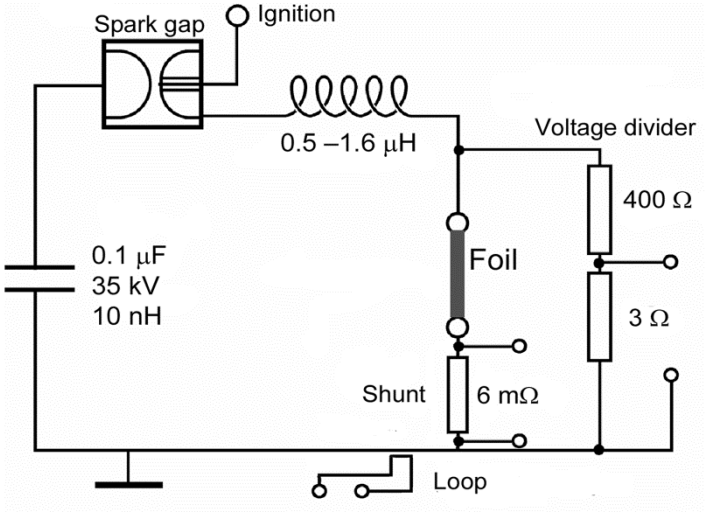
Экспериментальные условия

Генераторы. Институты.	Параметры генераторов	Фольги	Ток через фольгу
ГВП, ФИАН	8 кА, 350 нс, 20 кВ	4 мкм Al	~ 7 кА
КИНГ, ФИАН	200 kA, 200 нс, 40 кВ	4 мкм Al, 12.5 мкм Ti	180-200 kA
БИН, ФИАН	250 kA, 100 ns, 300 кВ	4, 16 мкм Al, 5-мкм, 1, 10 мкм Cu	40 - 80 kA
XP Корнельский университет	400 kA, 100 нс, 350 кВ	4,12, 16 мкм Al; 5 мкм Ni; 5, 10 мкм Cu; 12.5 мкм Ti	60 - 150 kA
COBRA, Корнельский университет	1000 kA, 100 нс, 600 кВ	4 - 100-μm Al, Cu, Ti	850-1000 kA

Генератор БИН (270 кА,100 нс, 300 kB)

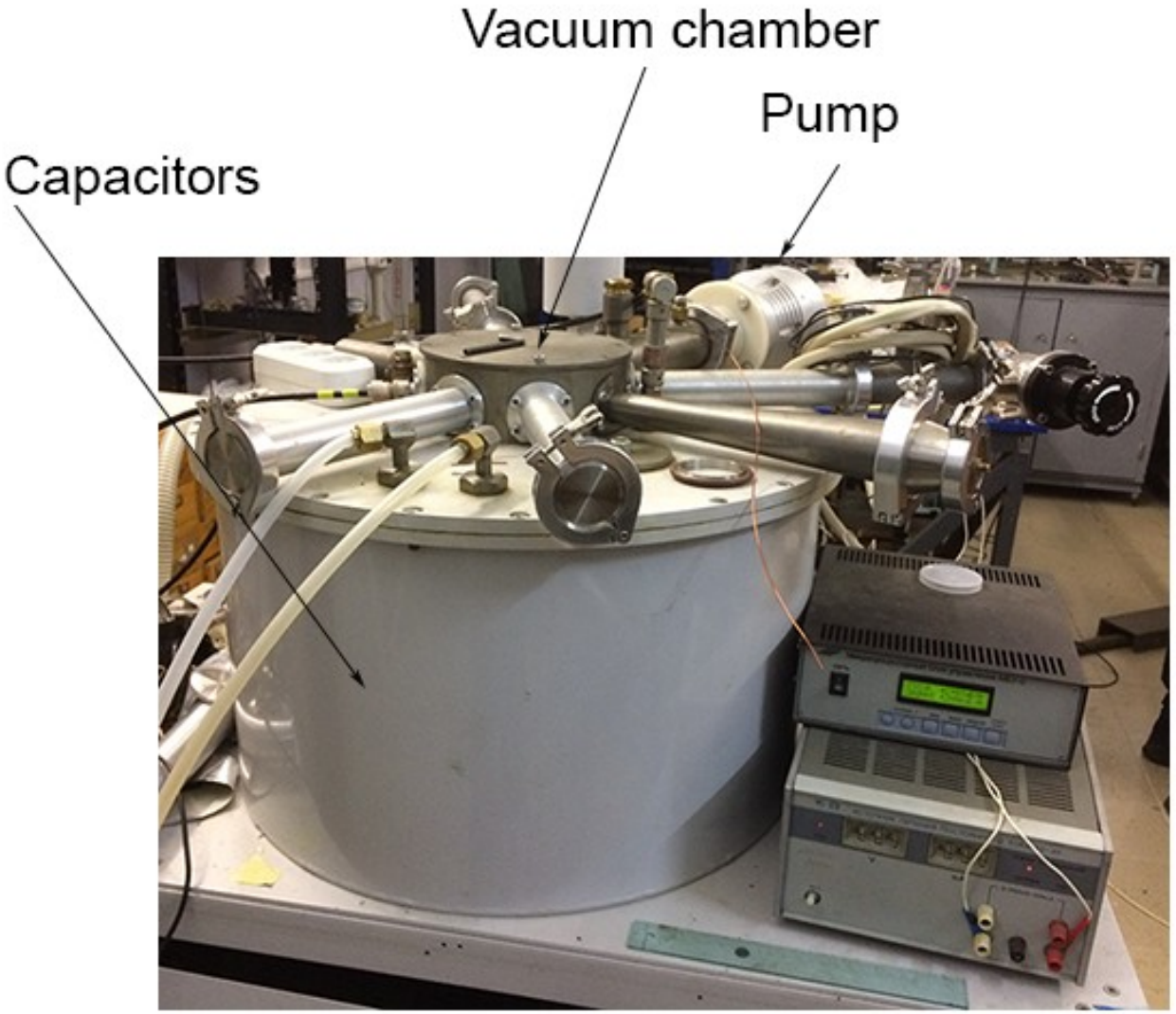




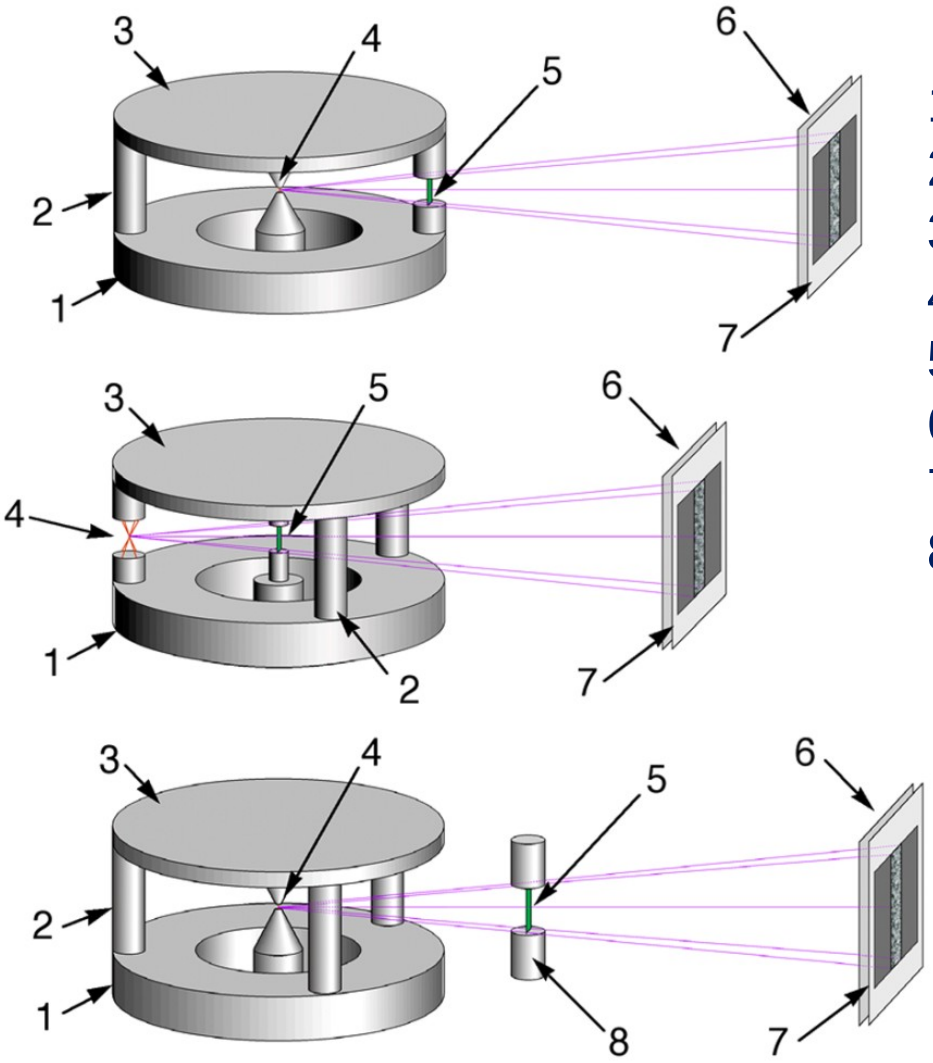


Генератор ГВП (8 кА, 20 кВ, 350 нс)

Генератор КИНГ (200 kA, 200 ns, 45 kV)



Схемы проекционной рентгенографии.

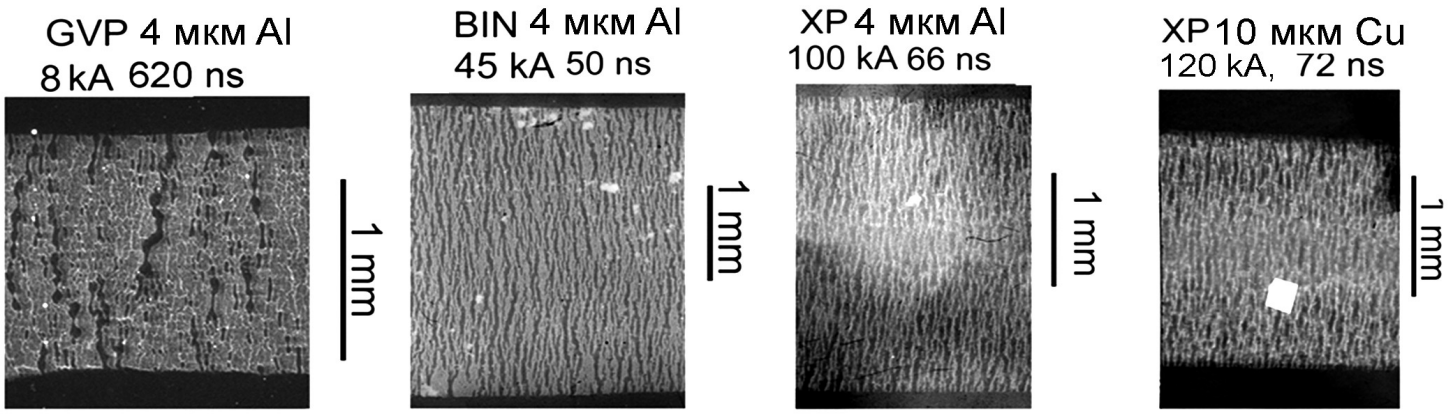


1 - высоковольтный электрод,
2 - стержни обратного тока,
3 - земляной электрод,
4 - Х-пинч,
5 - взрываемая фольга,
6 - фильтр 12,5 мкм Ti (2,5<E<5 кэВ)
7 - изобразительные пластины,
8 - высоковольтный электрод ГВП

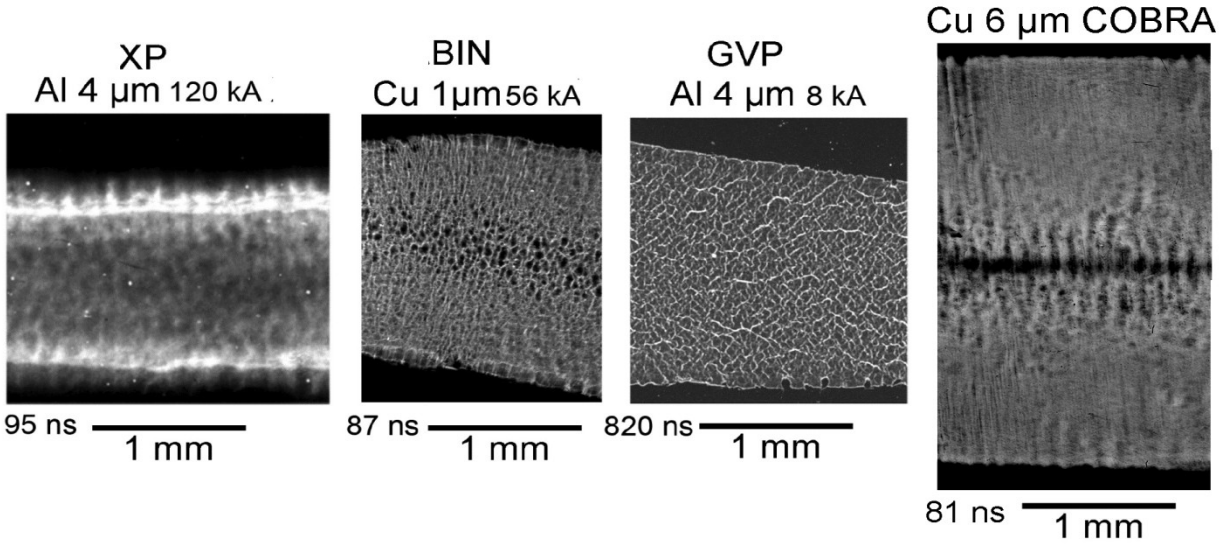
Пространственное разрешение
3-4 мкм
Временное разрешение
< 1 нс

Наблюдаемые структуры взорванных фольг оказались очень схожими для совершенно различных экспериментов

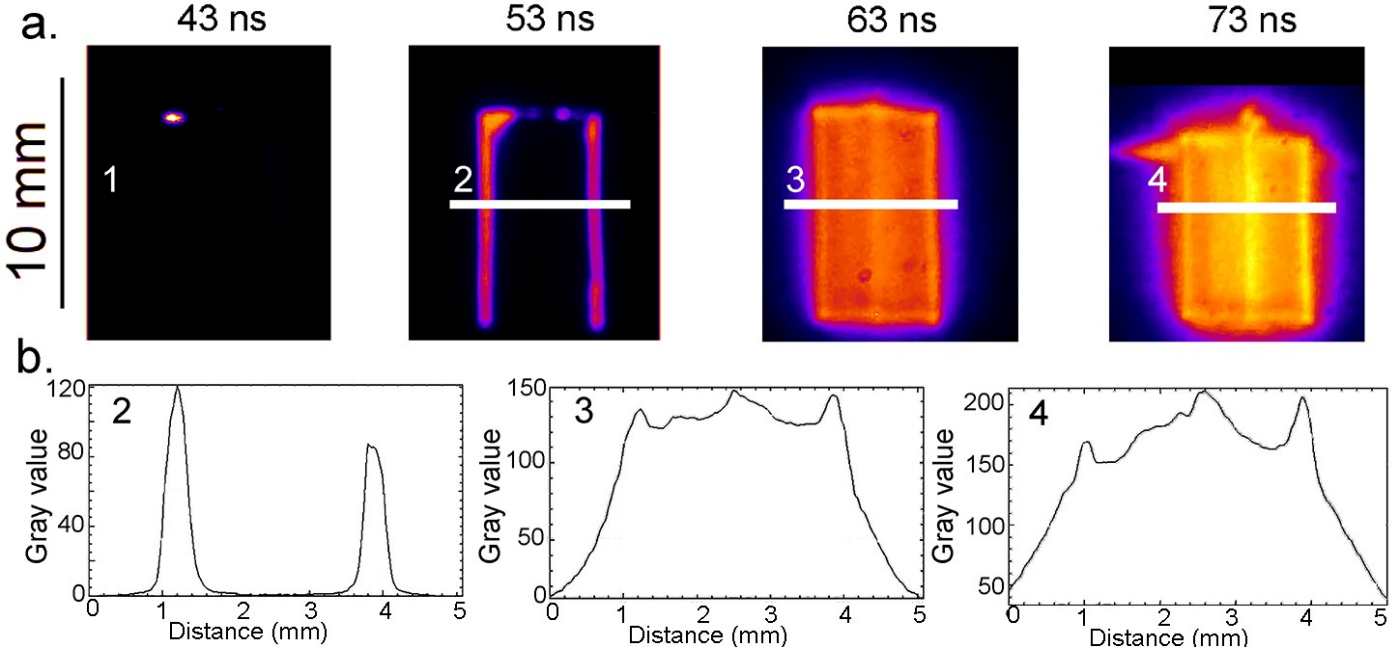
Разрывы



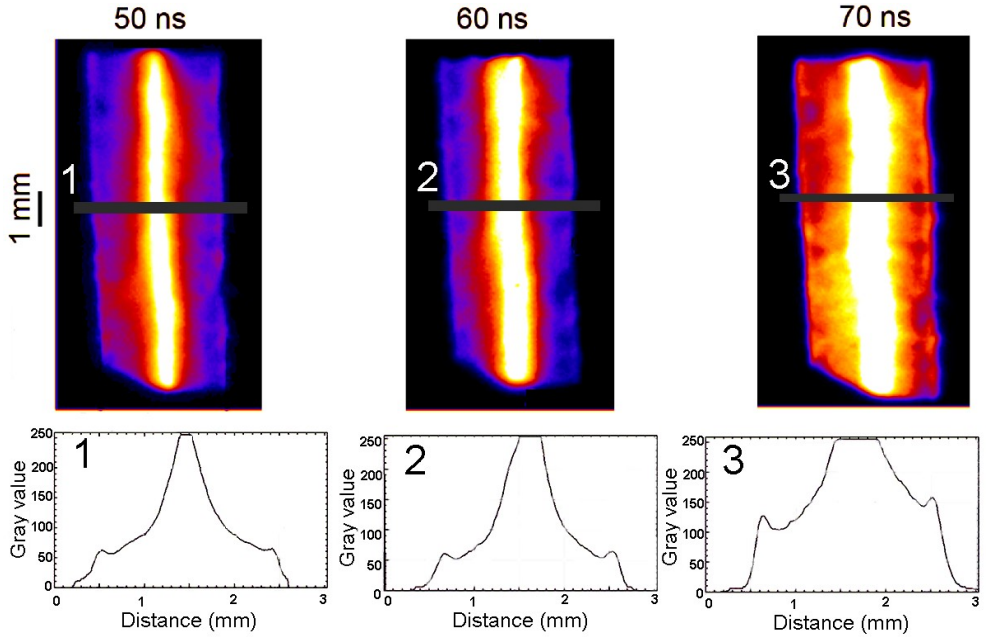
Пузыри



Динамика взрыва фольг оказалась весьма сложной

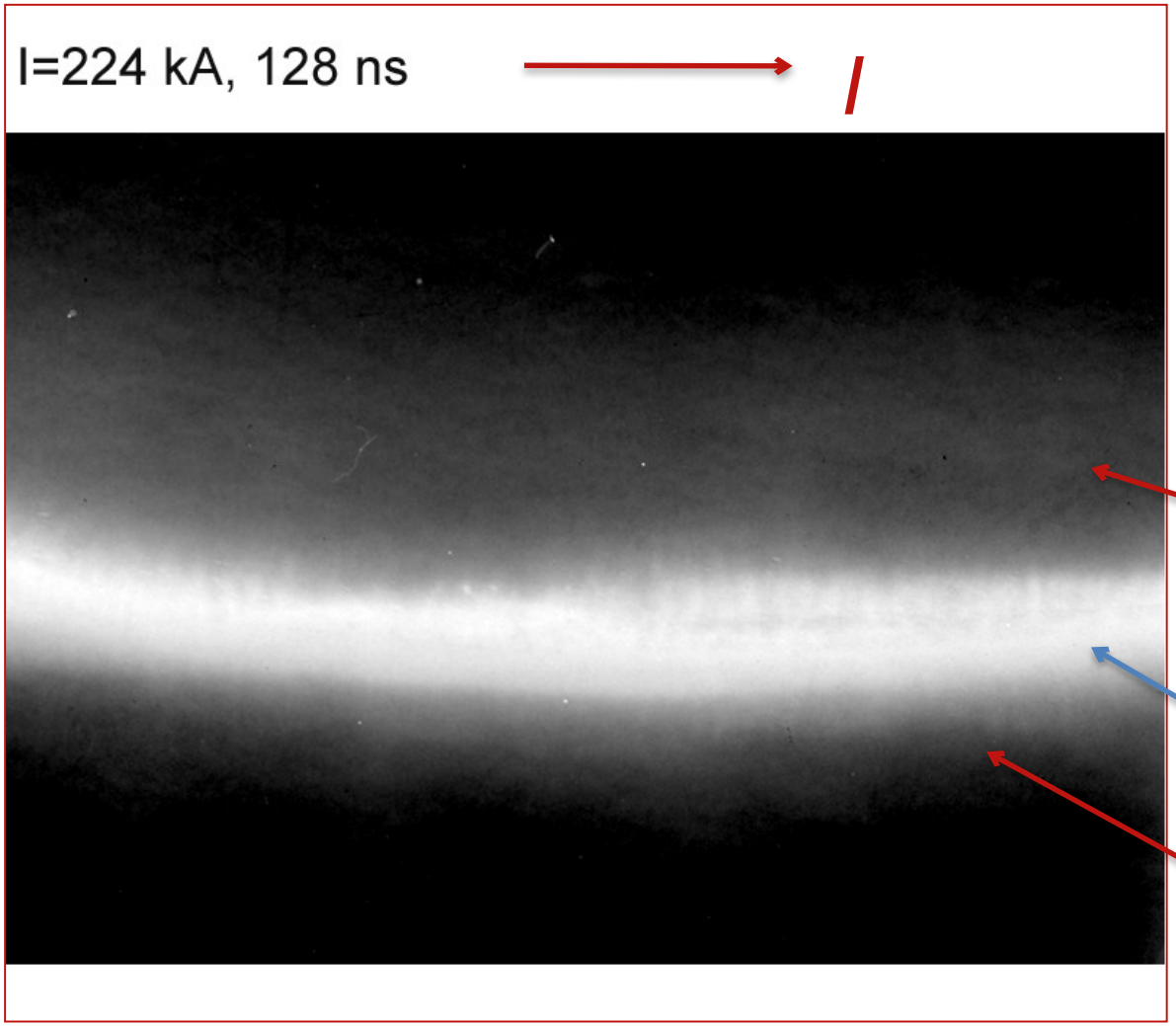


Генератор
COBRA
800 kA
Cu 7 мкм
УФ излучение
E > 50 эВ



Генератор
КИНГ
200 kA
Al 7 мкм
УФ излучение
E > 50 эВ

Образование керна и короны



4мкм x 3мм Al фольга

Корона

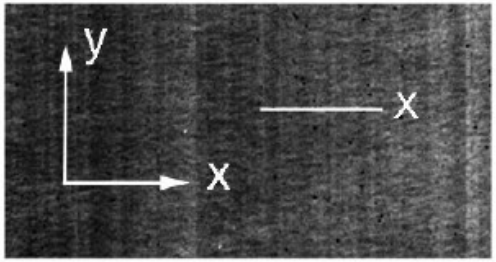
Керн

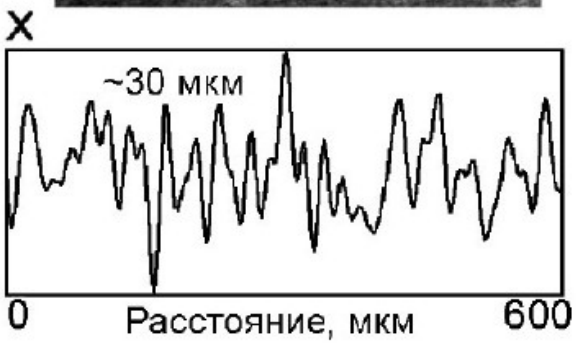
Корона

Точечная проекционная рентгенография вдоль поверхности фольги

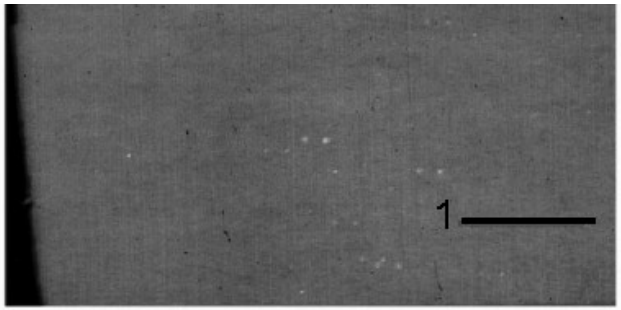
Собственная структура фольг

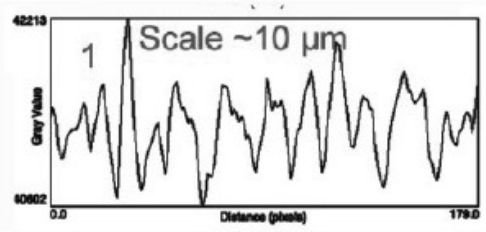
Al 16 мкм





Cu 10 мкм

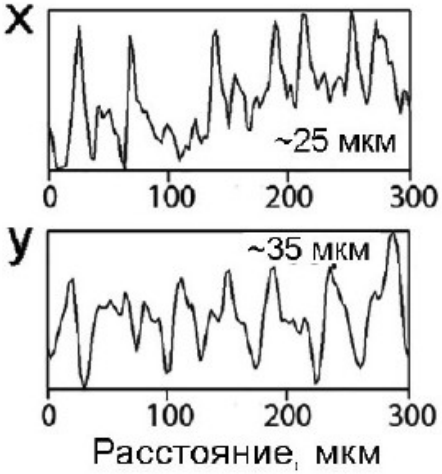


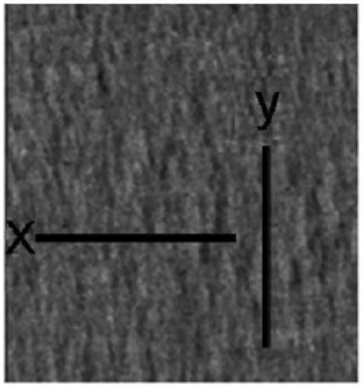


Al 4 мкм

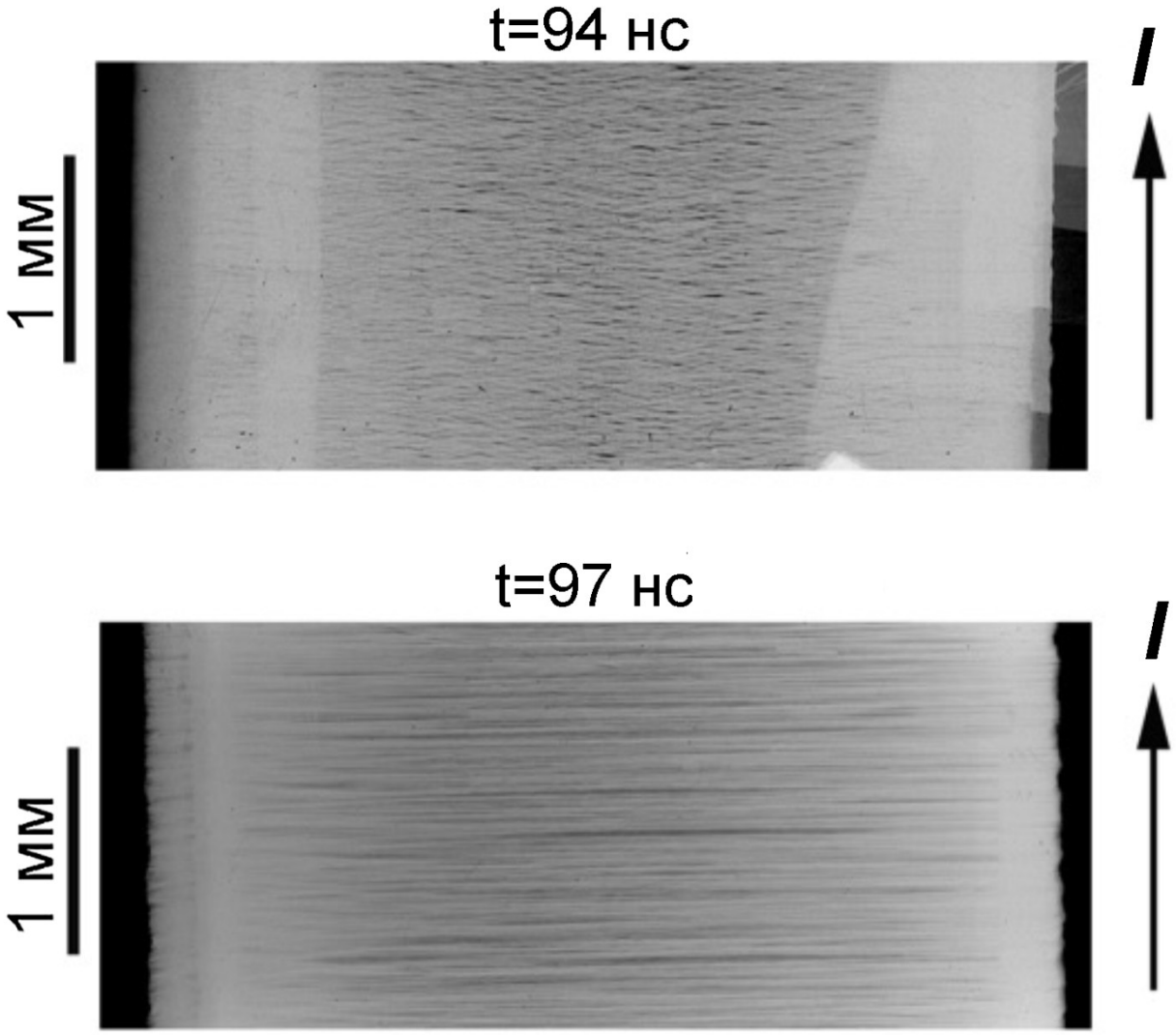
Короткая сторона СС

Длинная сторона СС





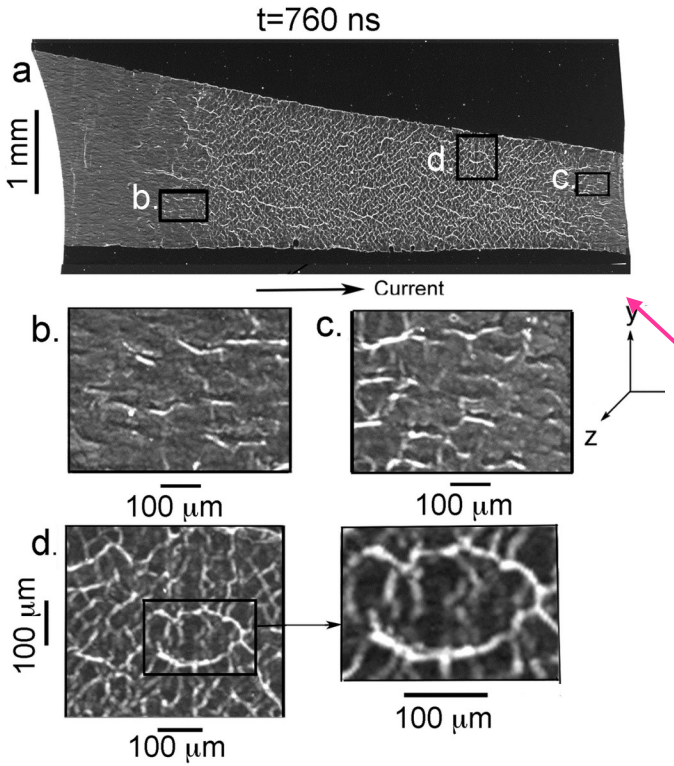
Структура фольги в цилиндрическом лайнере. Установка COBRA (1 МА), Корнельский университет

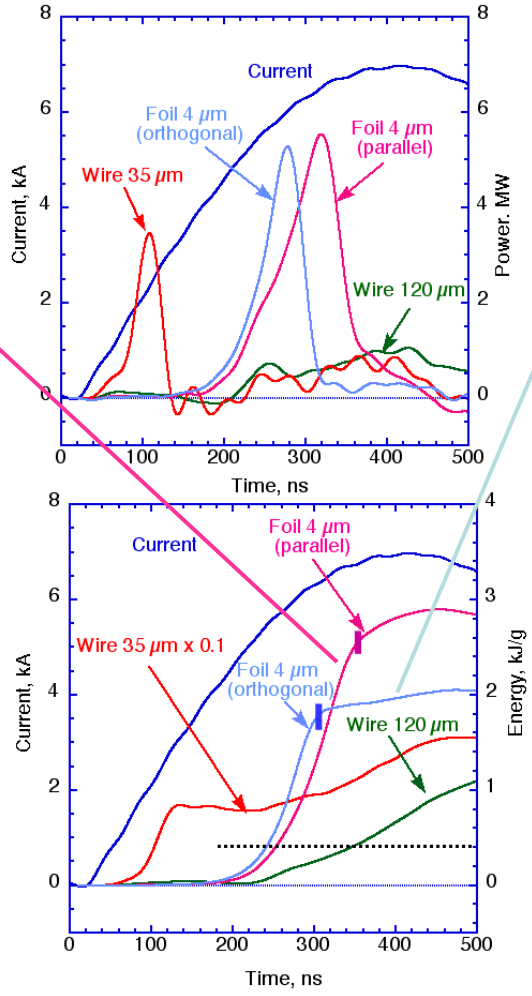


Рентгенограммы (2.5 <E <5 кэВ) Al фольги толщиной 16 мкм. Цилиндр диаметром 4 мм.

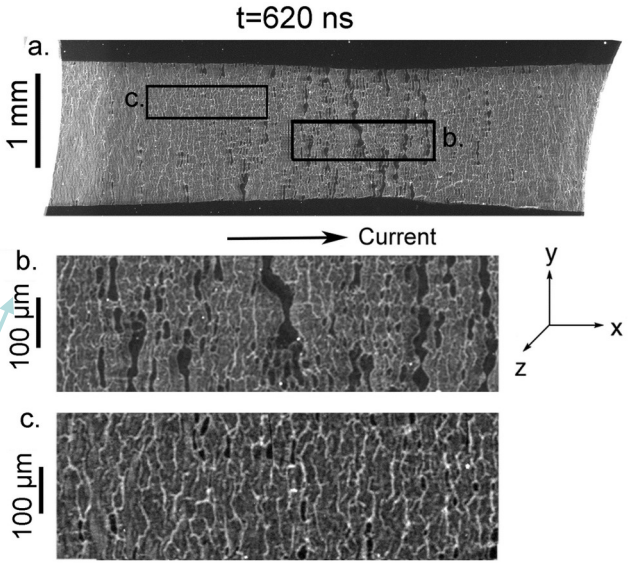
Рентгенограммы Al фольги толщиной 4 мкм, взорванные на генераторе ГВП.

Длинная сторона СС параллельна направлению тока.





Длинная сторона СС перпендикулярна направлению тока.



4 мкм Al фольга генератор ГВП

Энерговклад в фольгу значительно больше, чем в проволочку того же сечения

T. A. Shelkovenko et al., Journal of Applied Physics, 128, 205902 (2020).

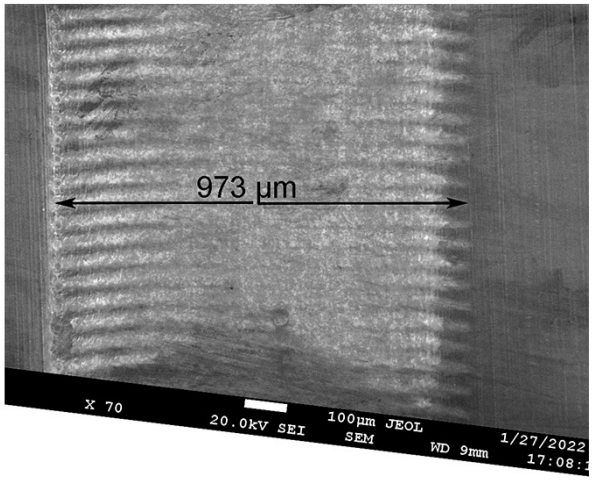
Если внутренняя структура оказывает влияние на характер взрыв, то имеет смысл сделать её искусственно

1. Изменить внутреннюю структуру можно, но сложно
2. Можно нанести что-либо на поверхность
3. Или удалить часть вещества, что и было сделано посредством лазерной гравировки.

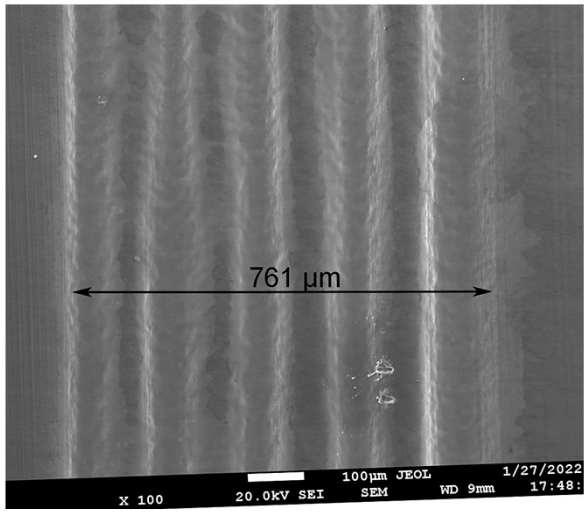
Примеры использованных искусственных структур (ИС).

Исходный материал - Al фольга толщиной 16 мкм с собственной структурой (СС).
Фокус 40 мкм. Максимальная интенсивность лазера 10^8 Вт/м^2

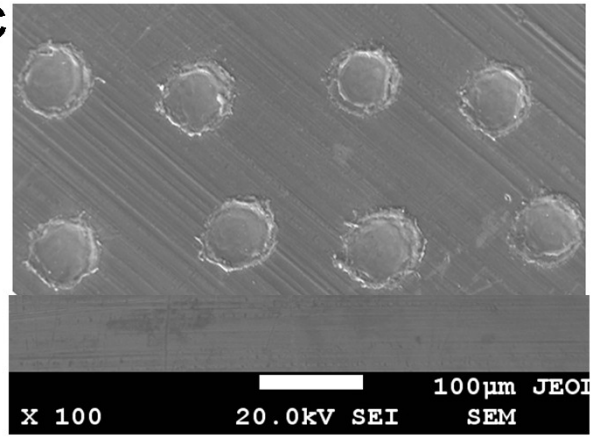
a.



b



c

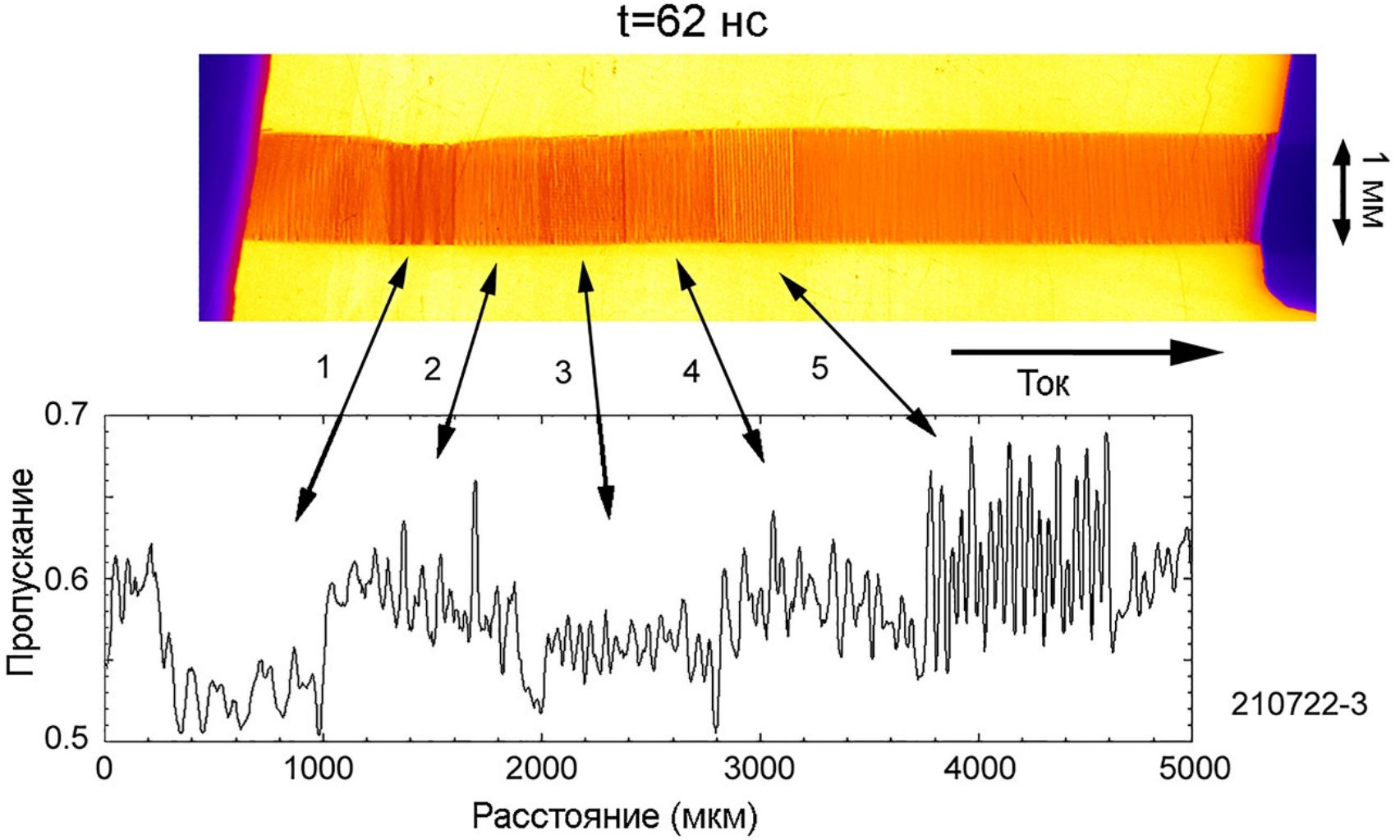


ИС ортогональна СС
40 проходов лазера
Шаг 50 мкм
45 % мощности

ИС параллельна СС
40 проходов лазера
Шаг 50 мкм
45 % мощности

ИС в виде
отдельных точек
диаметром 50 мкм.
Один проход.
80% мощности.

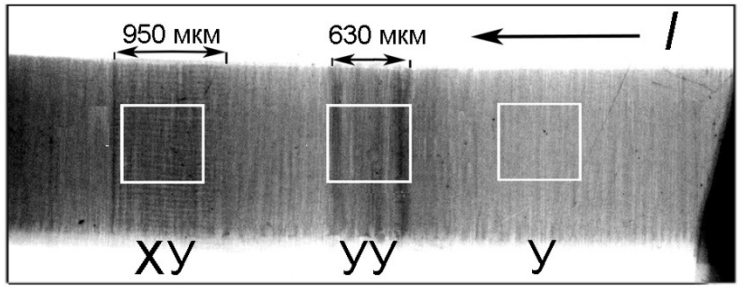
Влияние искусственной структуры на образование неустойчивостей

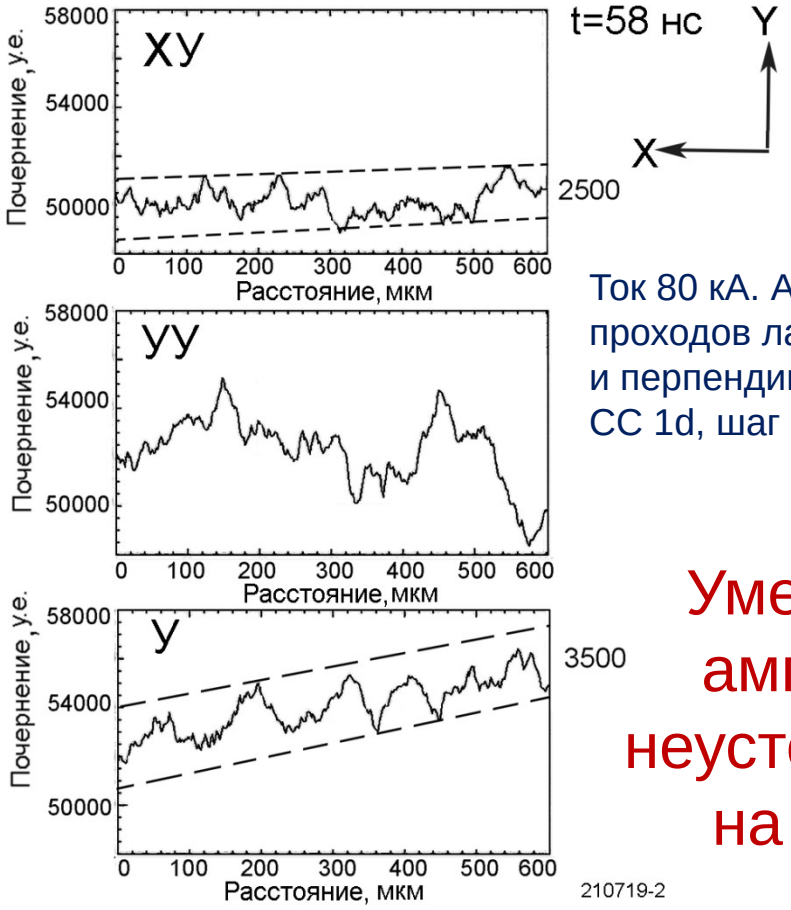


1 — ИС параллельна СС, 3 — ИС ортогональна СС, 5 — ИС в виде точек, 2,4 — без ИС

Генератор БИН. Ток через фольгу 70-80 кА, Al фольга 16 мкм.

Сглаживание неустойчивостей

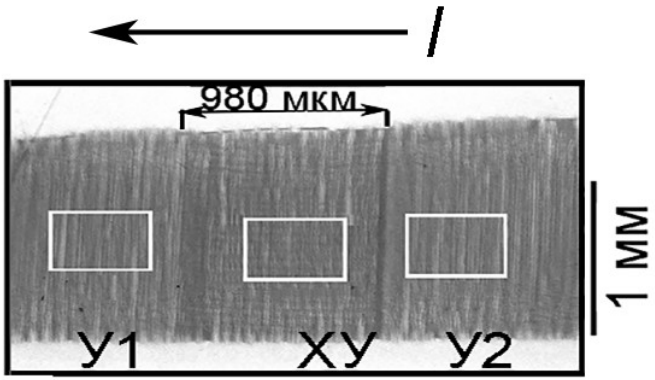


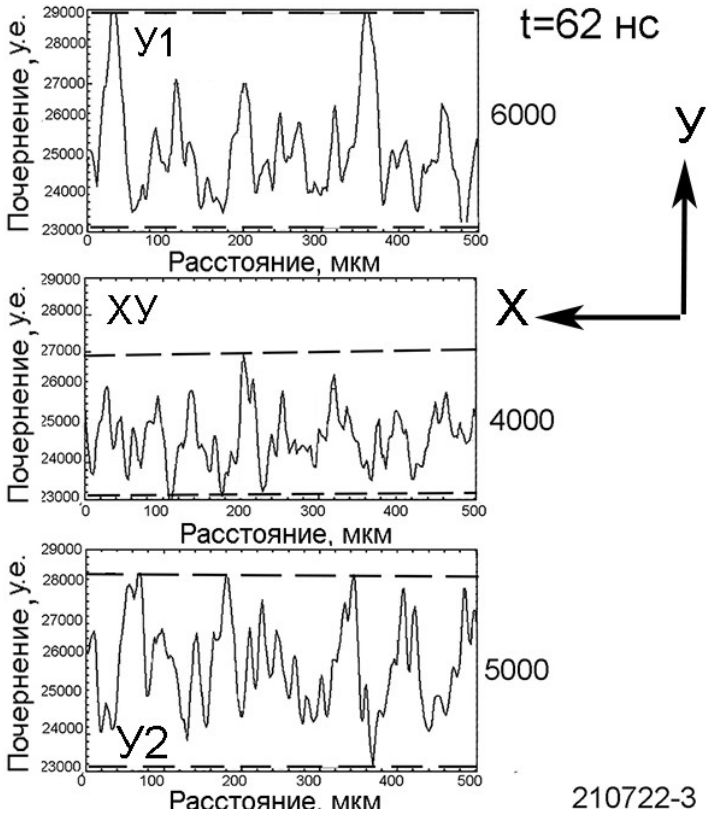


Ток 80 кА. Al фольга 16 мкм. 40 проходов лазера параллельно и перпендикулярно СС фольги. СС 1d, шаг 30 мкм.

Уменьшение амплитуды неустойчивостей на 15-25 %

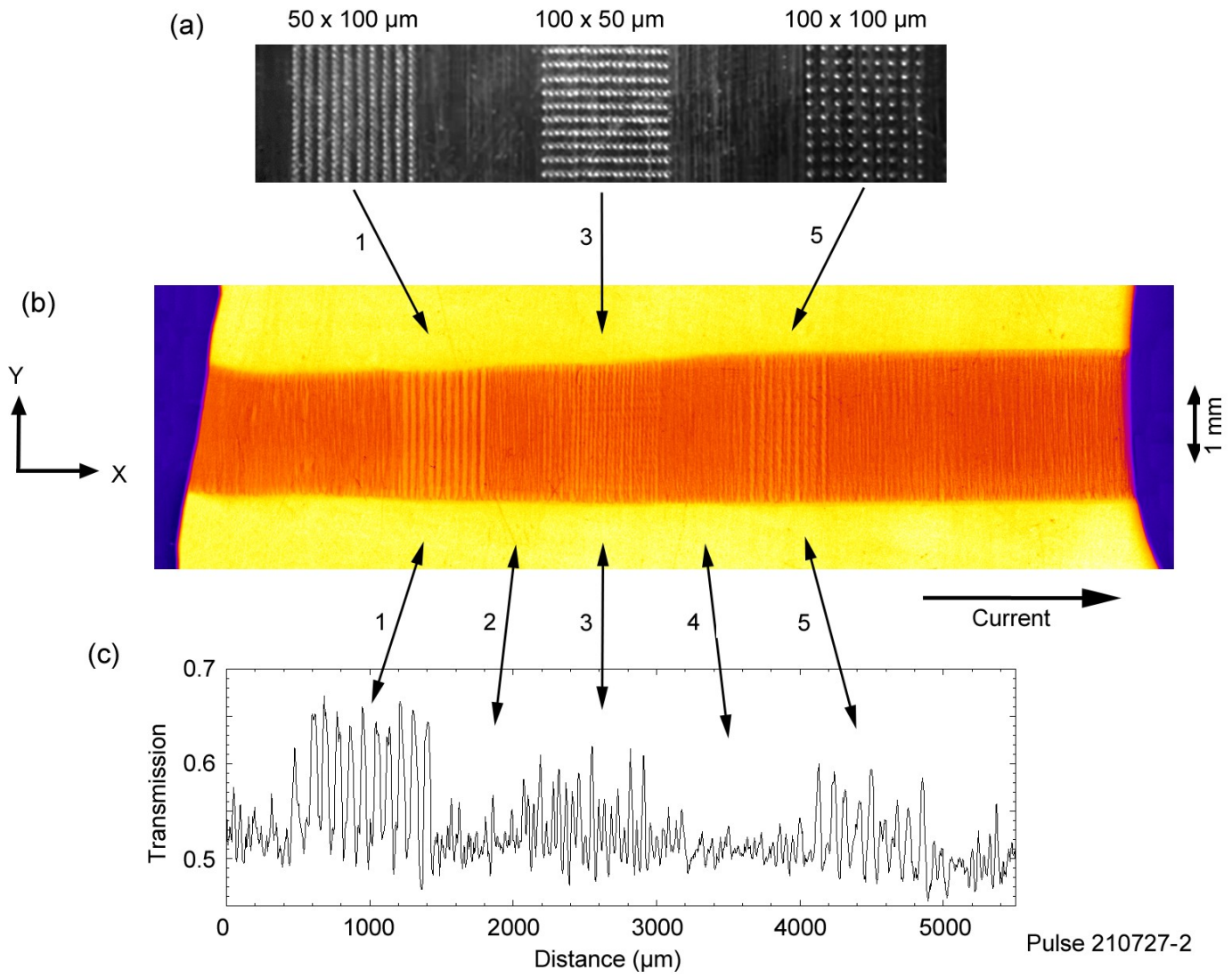
210719-2





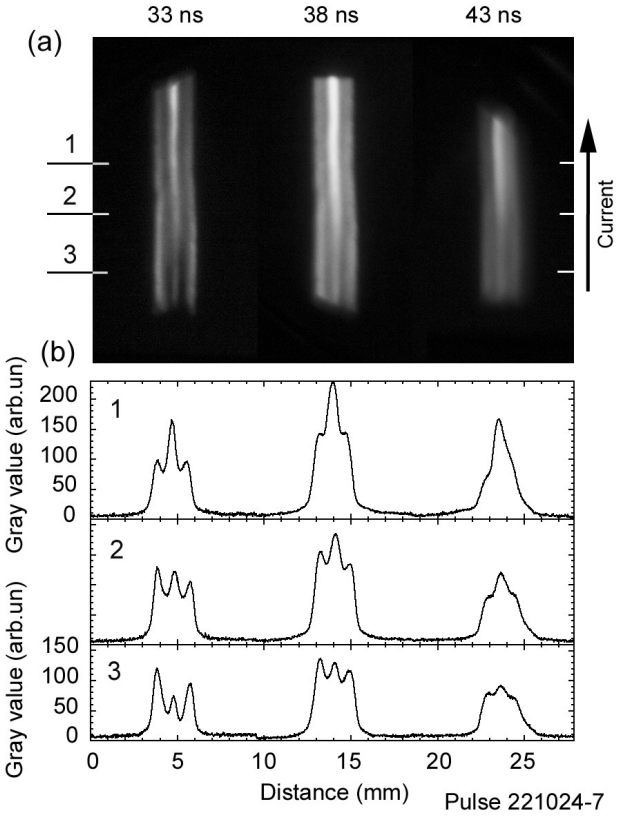
210722-3

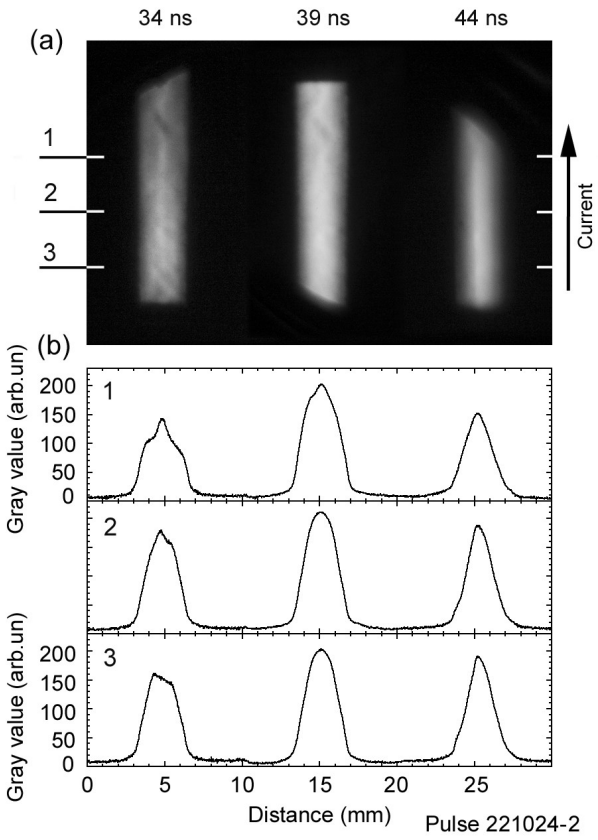
Влияние искусственной структуры в виде отверстий на образование неустойчивостей



Генератор БИН. Ток через фольгу 70-80 кА, Al фольга 16 мкм.

ЭУФ излучение фольги (E > 50 эВ)





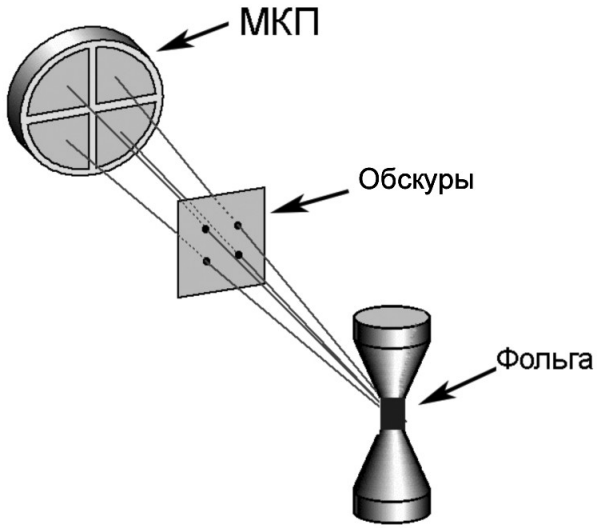


Схема регистрации

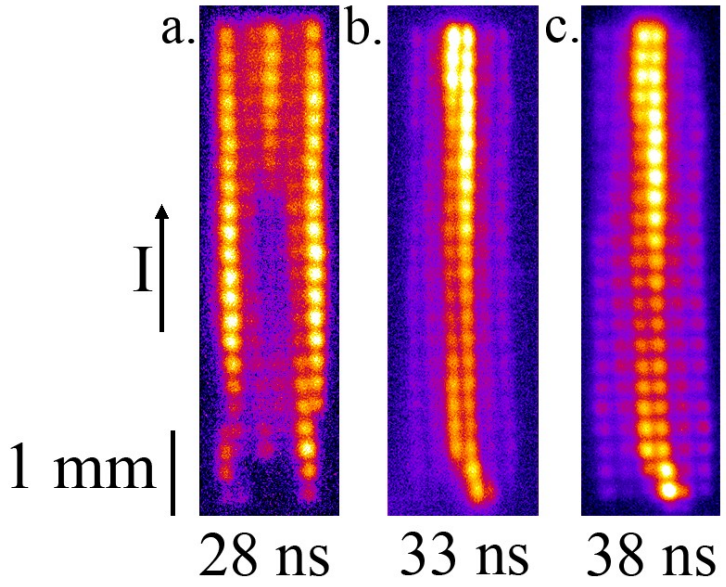
Фольга без воздействия

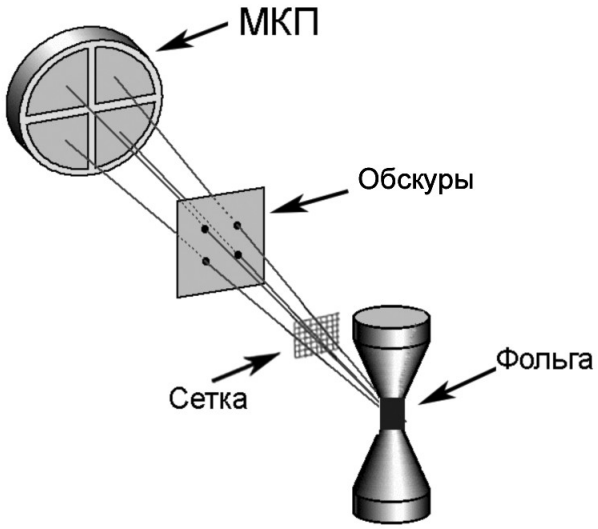
Фольга с отверстиями диаметром 50 мкм и шагом 100 мкм.

Генератор КИНГ. Ток через фольгу 180 кА, Al фольга 4 мкм.

Радиография в ЭУФ излучение фольги (E > 50 эВ)

Фольга без воздействия





Фольга с отверстиями диаметром 50 мкм и шагом 100 мкм.

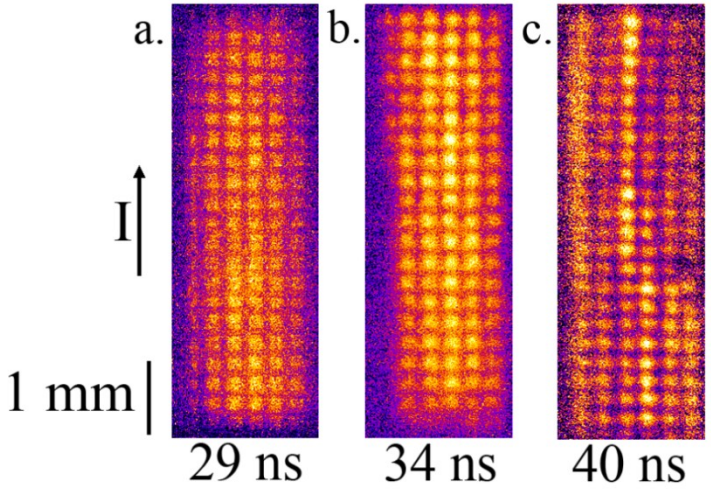
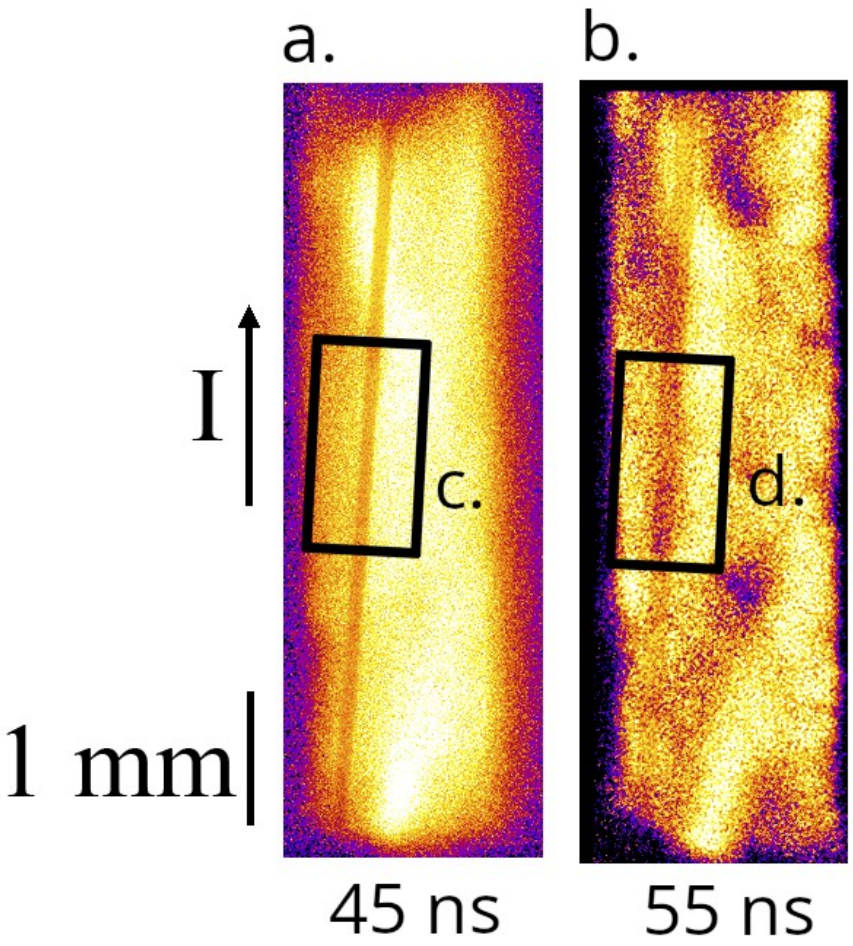
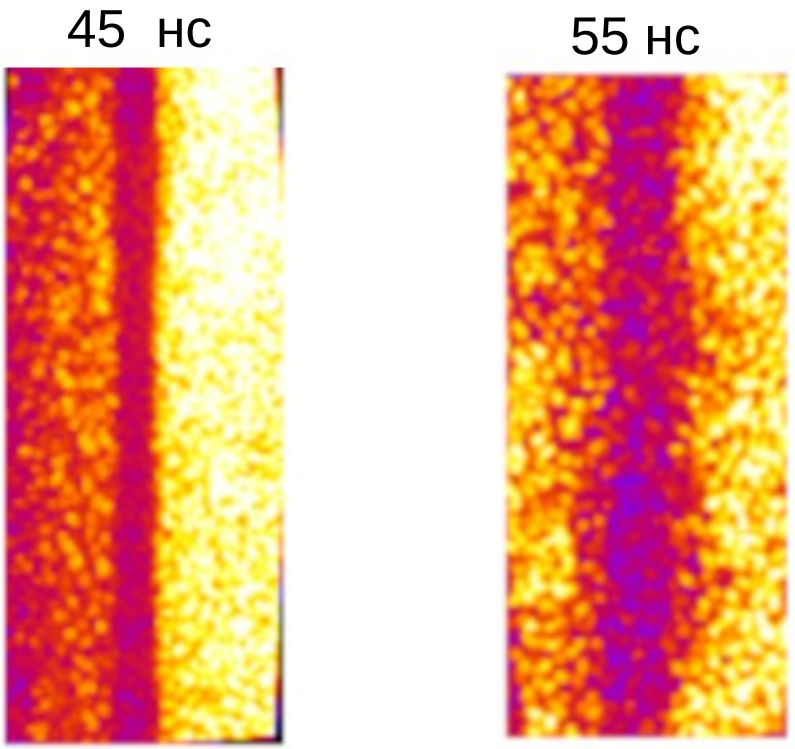


Схема регистрации

Генератор КИНГ. Ток через фольгу 180 кА, Al фольга 4 мкм.

Радиография в ЭУФ излучение фольги (E > 50 эВ)



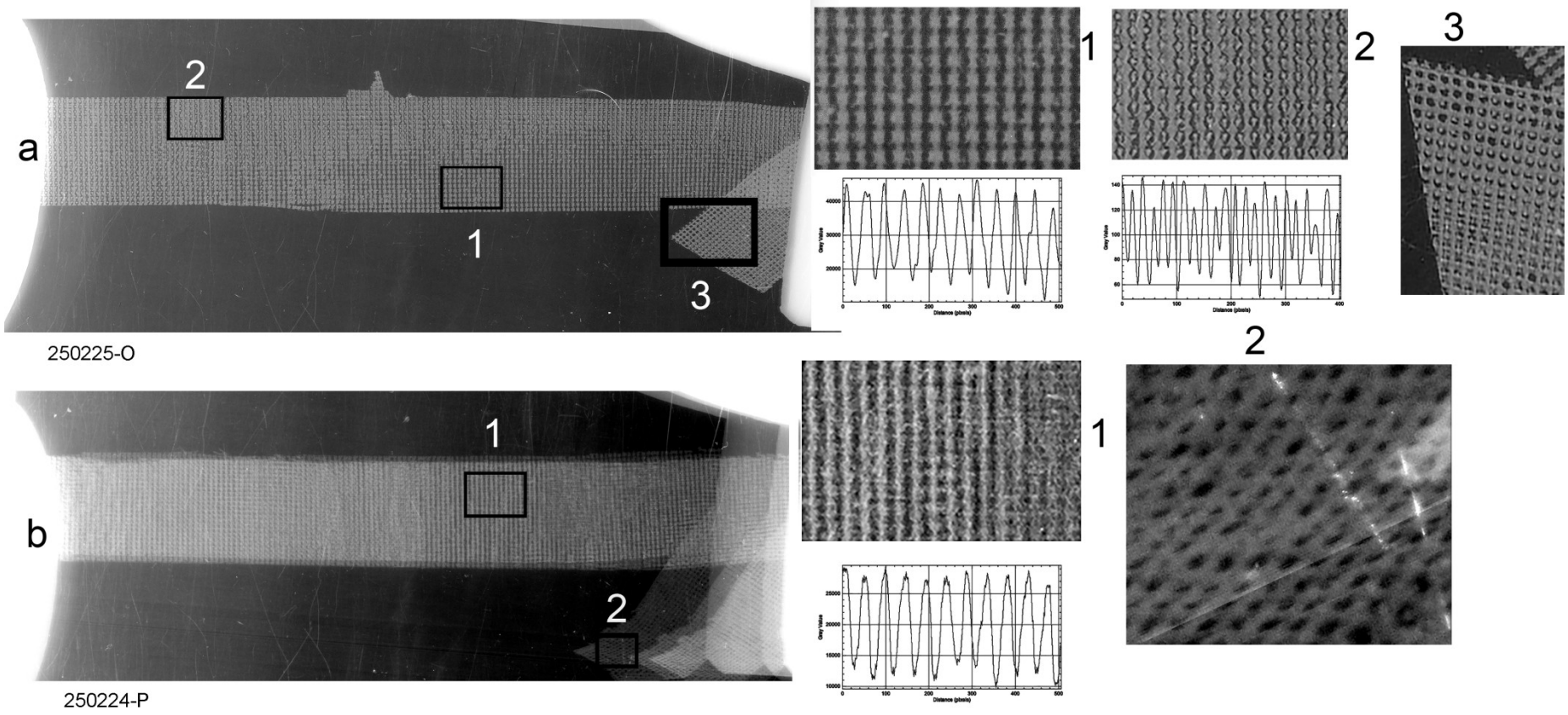


Взрыв алюминиевой проволочки в обратном токопроводе, ток 30 кА

Фольга с отверстиями диаметром 50 мкм и шагом 100 мкм.

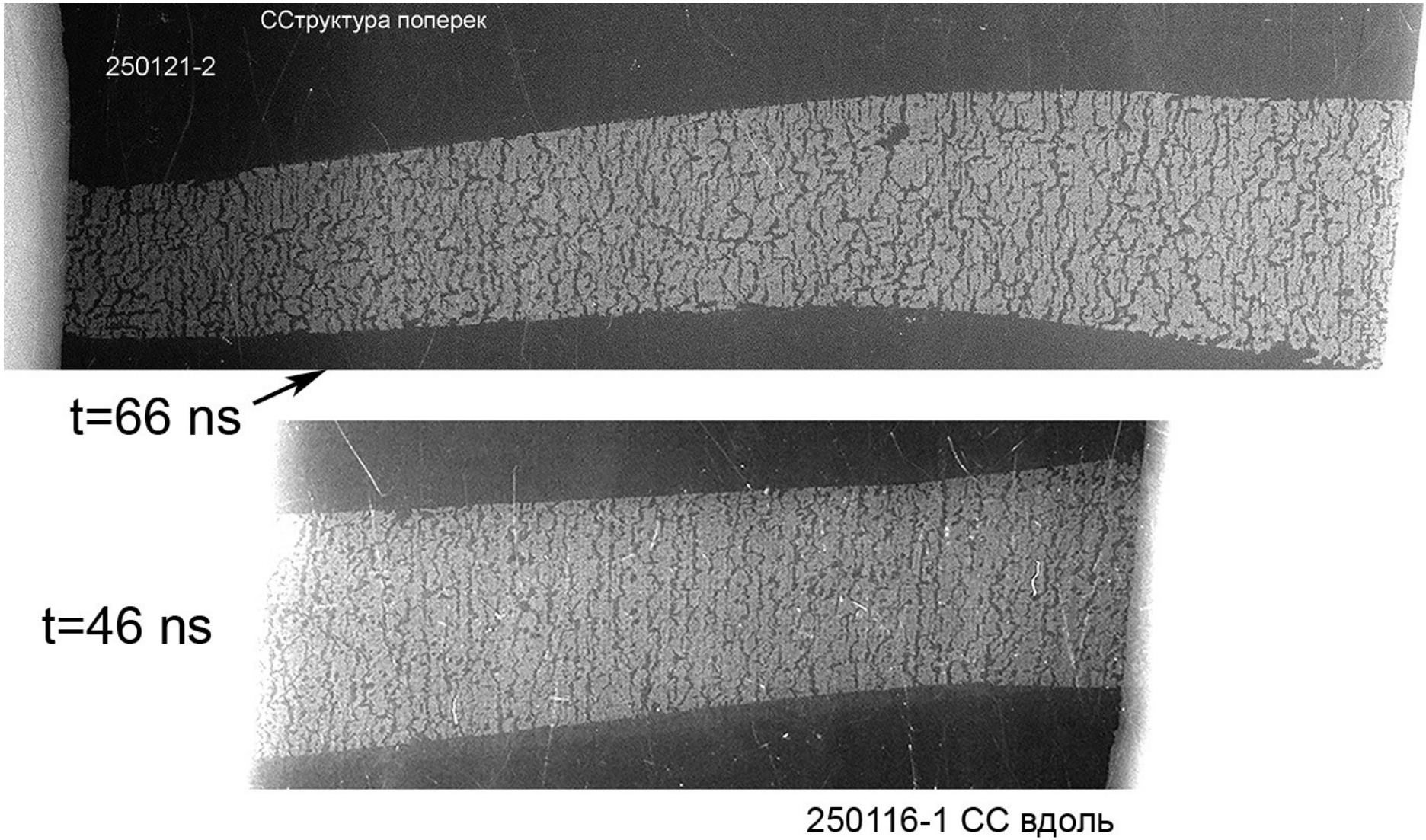
Генератор КИНГ. Ток через фольгу 180 кА, Al фольга 4 мкм.

Исследование взрыва фольг со сквозными отверстиями



Генератор БИН.
Ток через фольгу 70-80 кА, Al фольга 16 мкм.
Отверстия с шагом 50 мкм.
Момент выстрела: a - 60 нс, b - 50 нс.

Влияние направления собственной структуры фольги

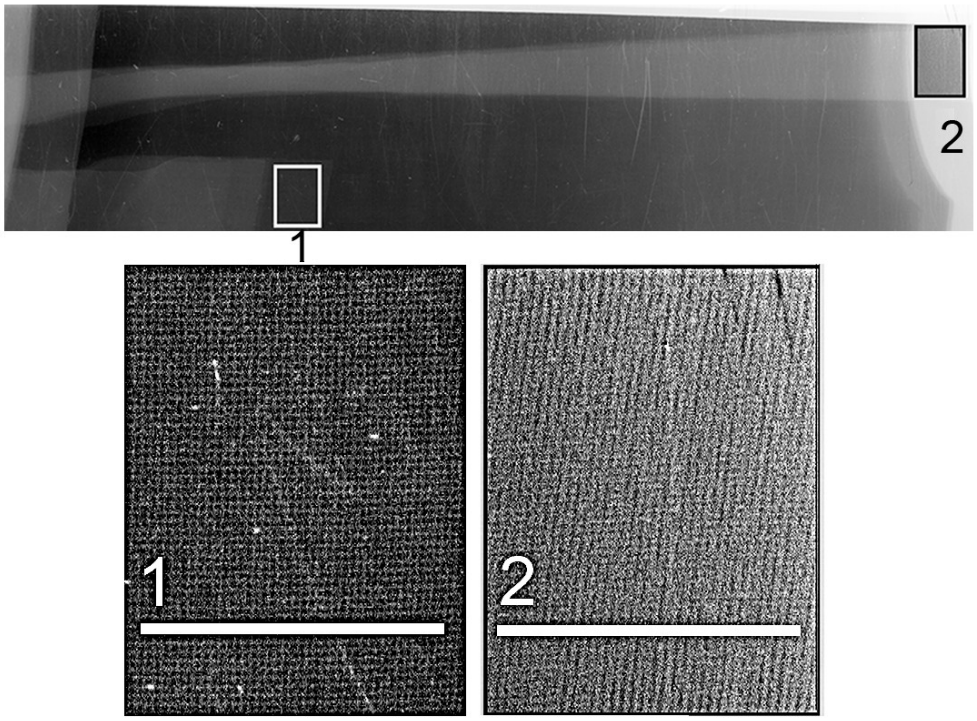


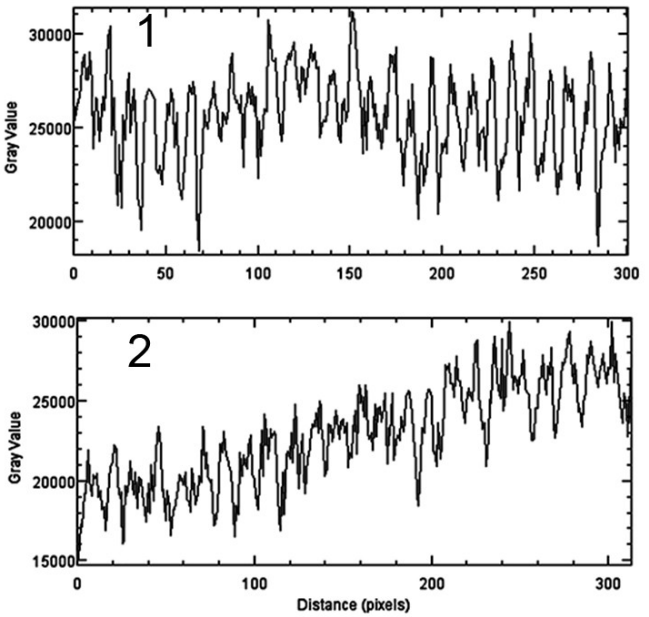
Генератор БИН.

Ток через фольгу 70-80 кА, Al фольга 16 мкм.

Отверстия с шагом 50 мкм.

Исследование взрыва Ni-сетки





t=60 ns

250123

Генератор БИН.
Ток через сетку 70-80 кА.
Ni сетка с толщиной проволочки 10 мкм и шагом 25 мкм.
Момент выстрела 60 нс.

Выводы

1. Взрыв фольги может быть управляем.
2. Возможно создание источника ЭУФ излучения, имеющего большие размеры 4x20 мм, и равномерно излучающий со всей поверхности от 20 до 70 нс.
3. Представлен метод использования четырех кадровой МКП с камерами-обскурами для получения время-разрешенных (с кадром 5 нс) изображений объекта.
4. Наличие у фольги искуственной одномерной структуры в виде канавок приводит к замедлению развития неустойчивостей на 15–35%.
5. Наличие структуры в виде отверстий позволяет сделать процесс взрыва как равномерным, так и создать разрывы с требуемым шагом, что позволит создать наноструктуры требуемого размера.