



Возможные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе

*Ткаченко С.И.¹, Пикуз С.А.², Шелковенко Т.А.²,
Мингалеев А.Р.², Романова В.М.², Тер-Оганесьян А.Е.²*

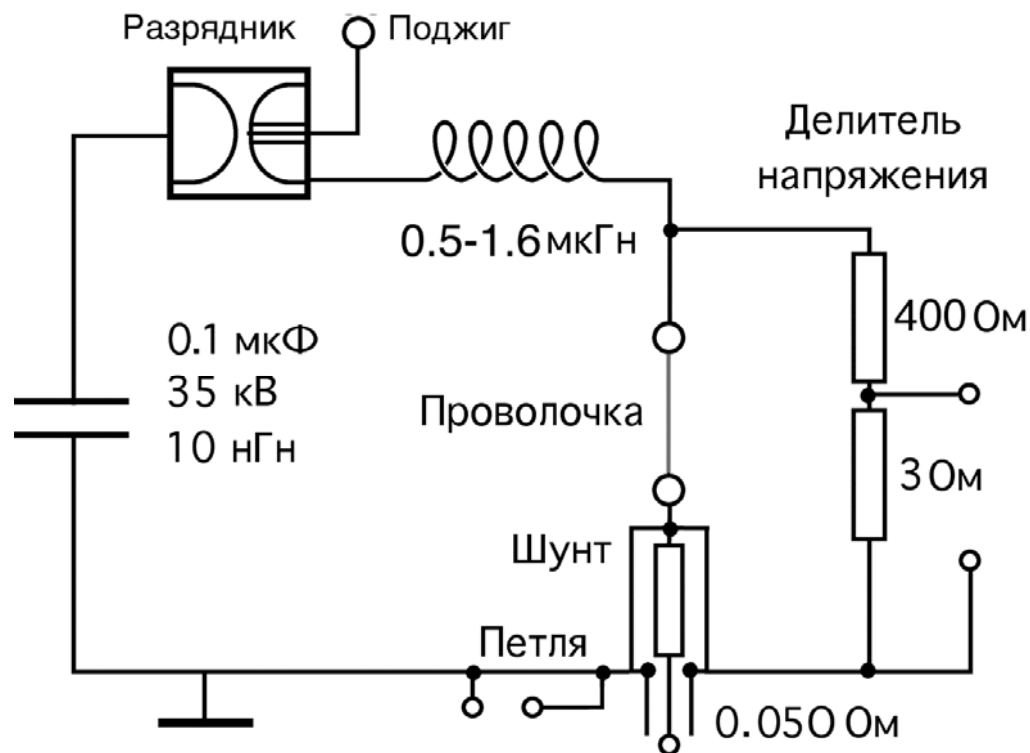
¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт высоких температур, РАН, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Схема экспериментальной установки

($I_{\max} \sim 10$ кА, $dI/dt \sim 50$ А/нс)



1. YAG:Nd+3 (2-я гармоника), $\lambda=532$ нм; $\tau=10$ нс, $W=0,03$ Дж.
2. Длиннофокусная линза

3. Проволочка

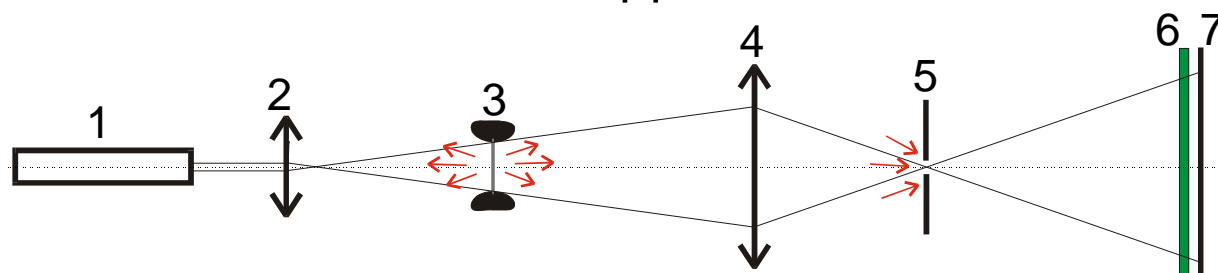
4. Объектив

5. Диафрагма ($\varnothing=1,5\div 5$ мм)

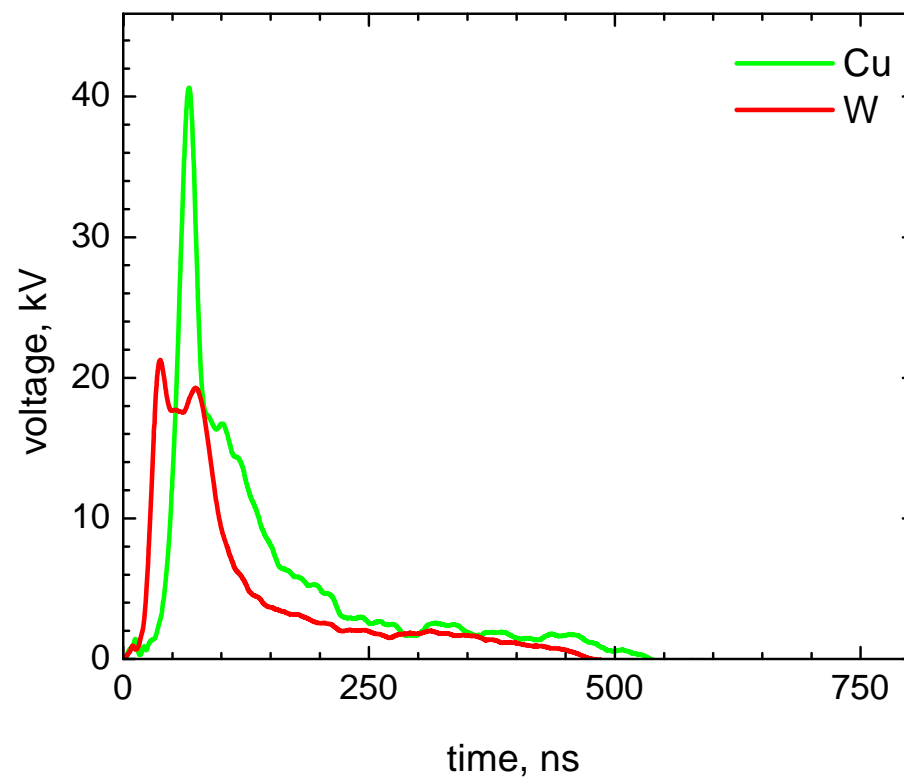
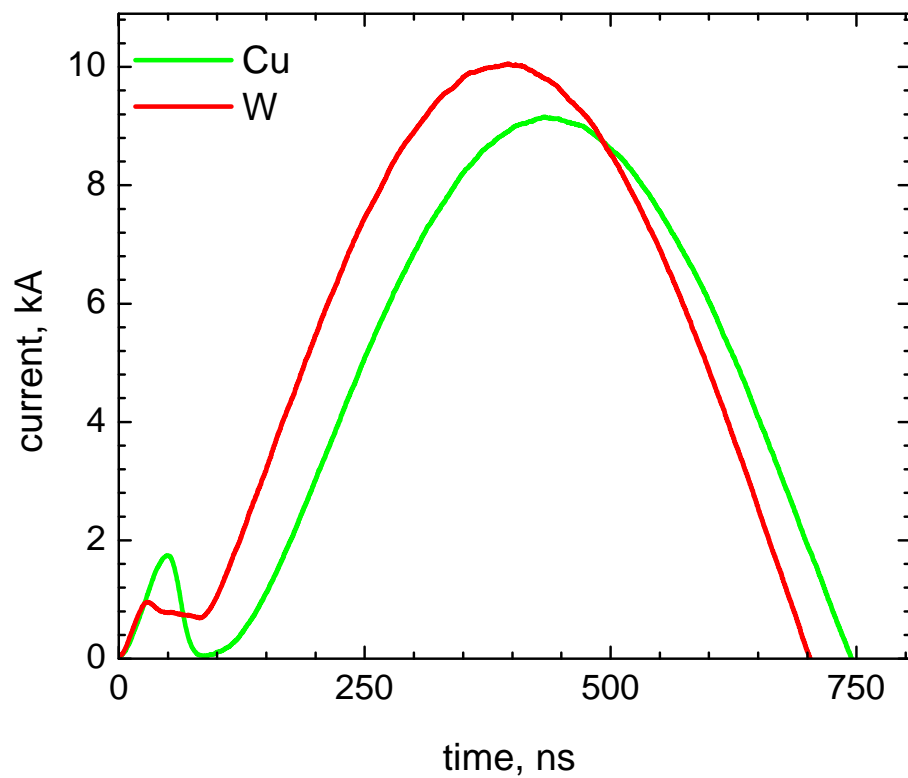
6. Зелёный фильтр СЗС-21

7. Приемник

схема оптической диагностики



Временные зависимости тока и напряжения при электрическом взрыве проволоочки ($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)

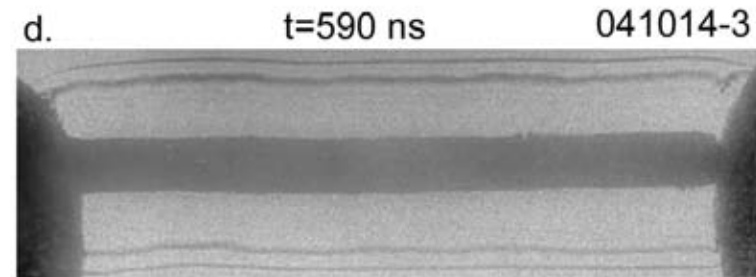
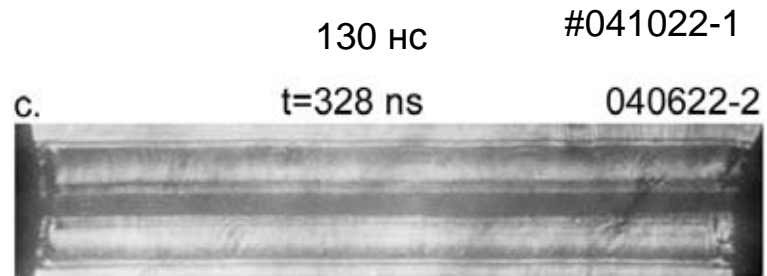
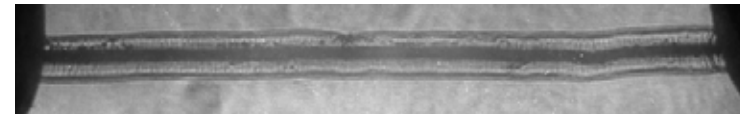
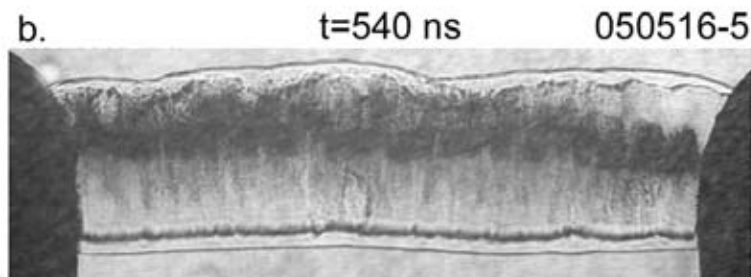
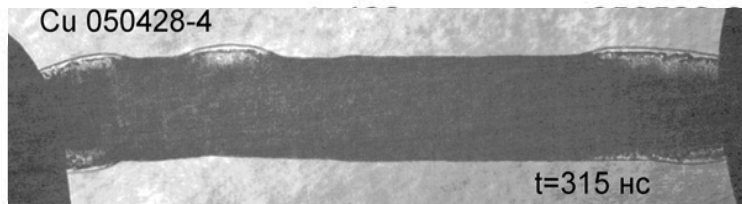
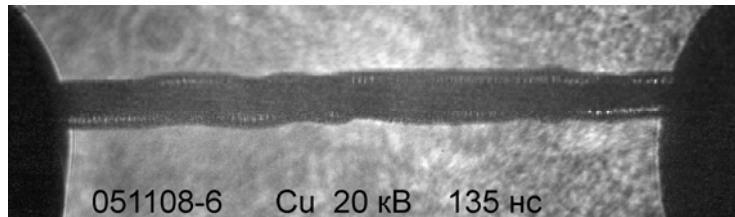


Изображение структуры канала разряда при взрыве 25 мкм
проволочек ($l = 12\text{мм}$) $U_0 = 20\text{ кВ}$

Cu

В ВОЗДУХЕ

W

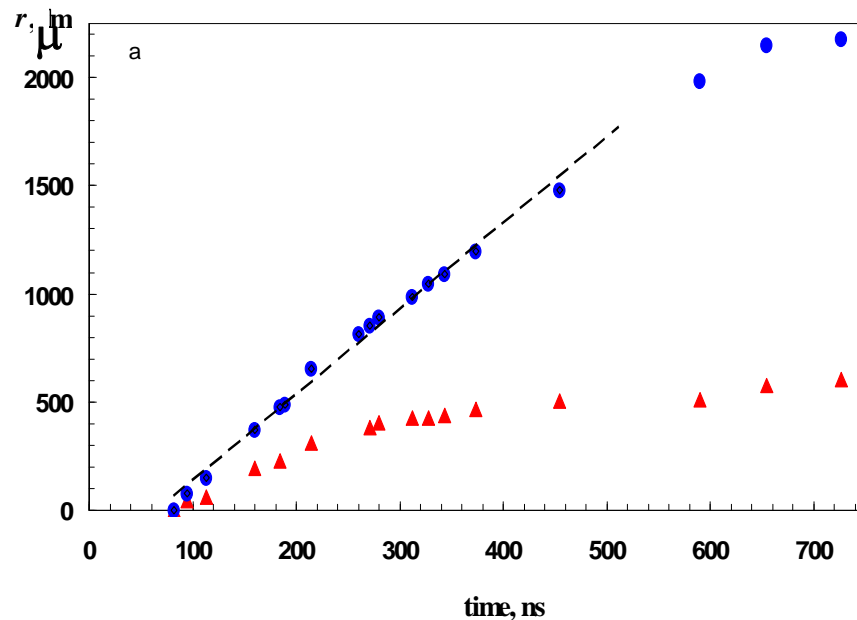


Формирование ударных волн в воздухе при электрическом взрыве 25-ти мкм проволочек

Перемещение фронта ударной волны и плотных продуктов взрыва при электрическом взрыве 25-ти мкм W проволочки

МОДЕЛЬ СИЛЬНОГО
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

$$r = A(E_l / \rho_0)^{0.25} (t - t_e)^{0.5}$$



$E_l \sim 0.75$ Дж/см и $E_l \sim 1.1$ Дж/см
(при взрыве вольфрамовой и медной проволочек, соответственно), что составляет не более 10 % от запасённой в цепи энергии (~ 20 Дж) и несколько превышает величину энергии, введённой в проволочку к моменту шунтирующего пробоя (~ 1 и 0.8 Дж при взрыве вольфрамовой и медной проволочек)

Параметры газа за фронтом УВ и ее структура

$$D_W = 4 \text{ км/с и } D_{Cu} = 3.2 \text{ км/с,}$$

$$M_W \sim 11 \text{ и } M_{Cu} \sim 9,$$

$$M = D/c_{s0} - \text{число Маха;}$$

$$c_{s0} = 350 \text{ м/с} - \text{скорость звука в воздухе}$$

предел сильной ударной волны, порождаемой поршнем

параметры газа за фронтом УВ

$$\rho_1/\rho_0 = (\gamma + 1)/(\gamma - 1)$$

$$P_1 = 2\rho_0 D^2 / (\gamma + 1)$$

$\delta \sim \tau u_g$ — ширина слоя релаксации

$$u_1 = 2D/(\gamma + 1)$$

$$\delta \sim 30 \text{ и } 120 \text{ мкм}$$

$$T_1 = 2\gamma D^2 / (c_p (\gamma + 1)^2)$$

$$T \sim 4.9 \text{ и } 3.4 \text{ кК}$$

$$i = 5, c_v = 5R/2, c_p = 7R/2 \text{ и } \gamma = 7/5$$

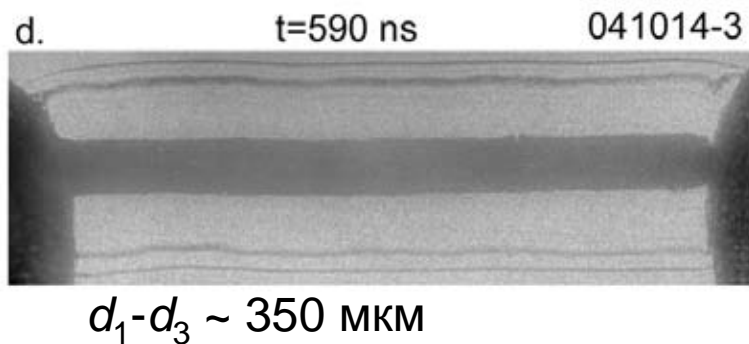
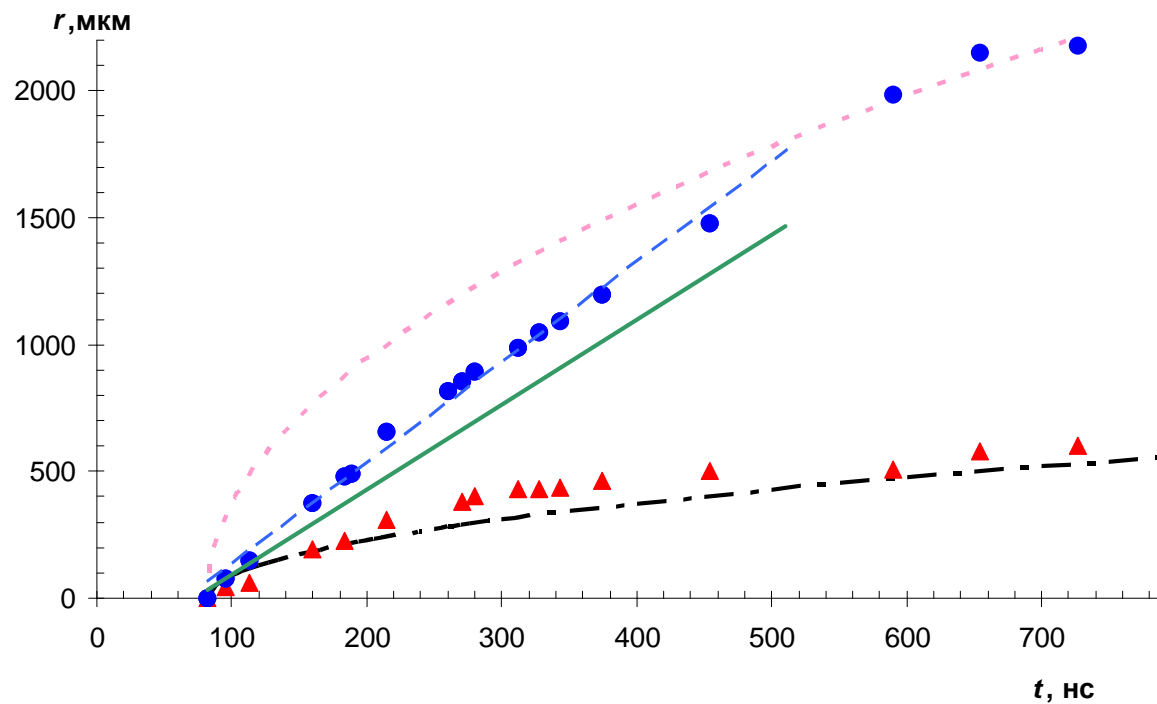
$T_1 = 7.5 \text{ и } 4.8 \text{ кК}$ — температура,

$P_1 = 16 \text{ и } 10.2 \text{ МПа}$ — давление

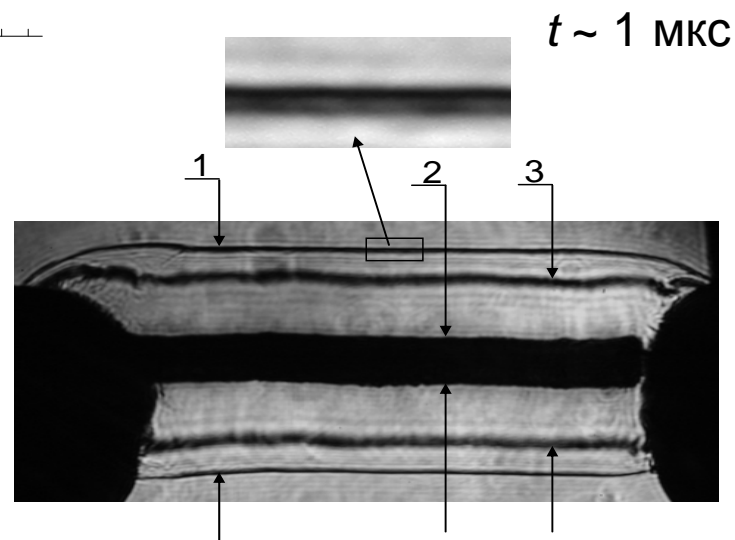
$u_1 = 3.3 \text{ и } 2.7 \text{ км/с}$ — скорость поршня

$\rho_1 = 7.2 \text{ кг/м}^3$ — плотность

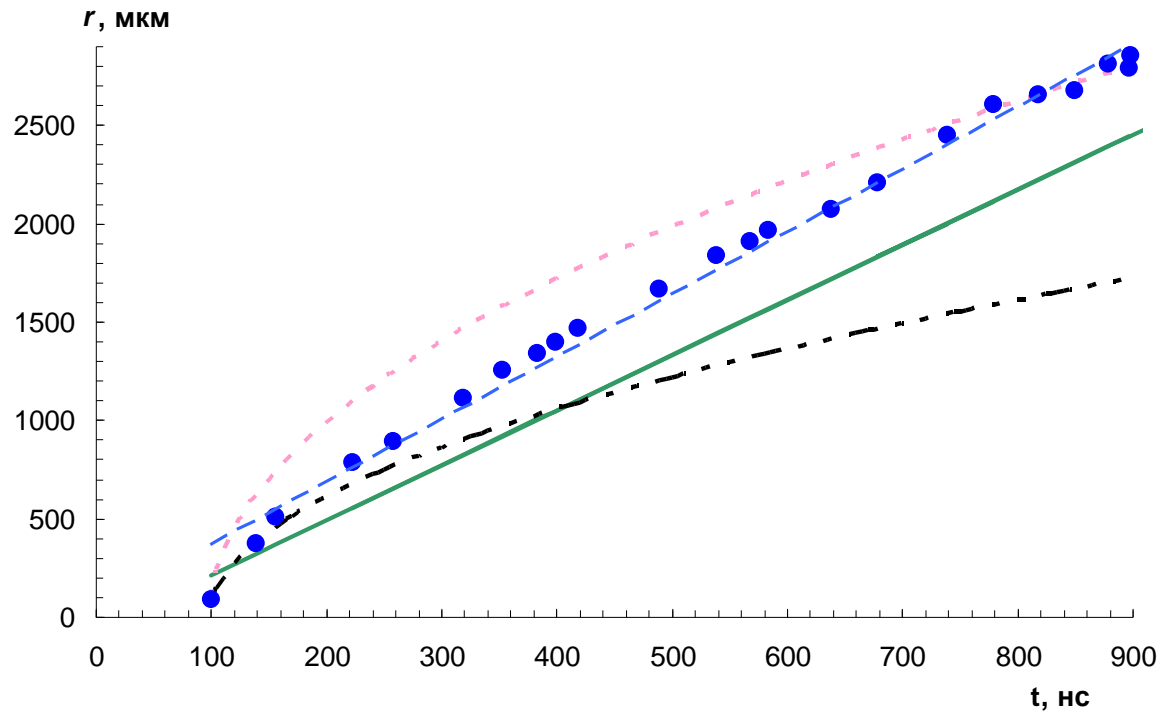
Структура канала разряда при электрическом взрыве W проволоочки ($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)



$d_1 - d_3 \sim 600$ MKM
 $\delta_{Wex} \sim 40$ MKM



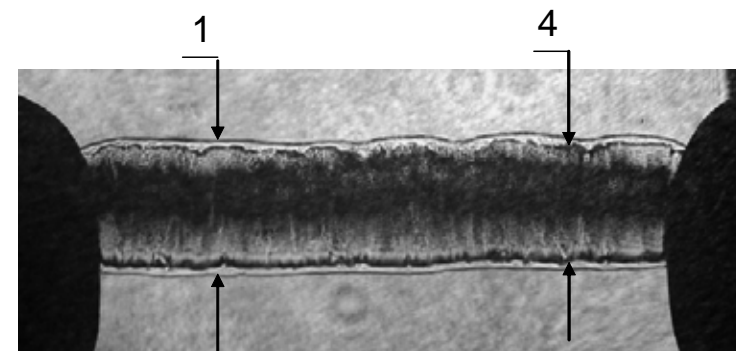
Структура канала разряда при электрическом взрыве Cu проволоочки ($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)



$t = 415$ нс

$$d_1 - d_3 \sim 200 \text{ MKM}$$

$$\delta_{\text{Cu}} \sim 120 \text{ MKM}$$



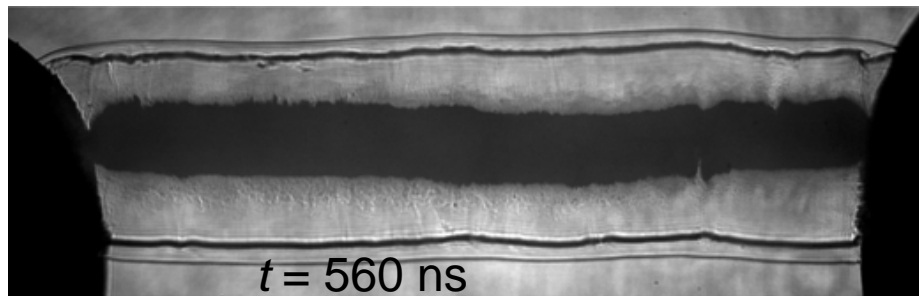
Можно утверждать, что при электрическом взрыве проволочек в воздухе возможно развитие вторичного пробоя (разряда) межэлектродного промежутка по **двум сценариям**

- В первом из них пробой происходит на границе плотных продуктов взрыва и среды, т.е. по парам металла в воздухе и в дальнейшем токопроводящая область «убегает» от этой границы вслед за ударной волной, как, например, при взрыве проволочки из тугоплавкого вольфрама. Причём шунтирование тока ограничивает дальнейший нагрев продуктов взрыва проволочки;
- Во втором варианте происходит внутреннее развитие пробоя: пробиваются продукты взрыва проволочки, а не окружающая среда. Пример развития такого процесса можно наблюдать при взрыве проволочки из легкоплавкой меди. Энергия продолжает вводиться в продукты взрыва проволочки, что поддерживает их дальнейшее расширение.

Различные сценарии развития вторичного пробоя
при взрыве проволочек в воздухе
($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)

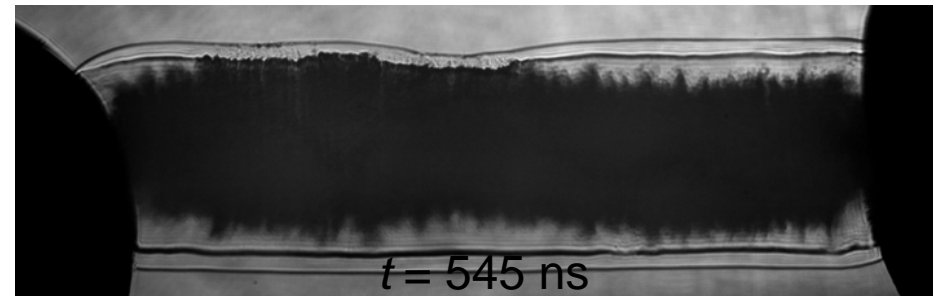
первый сценарий (шунтирующий пробой)

Mo

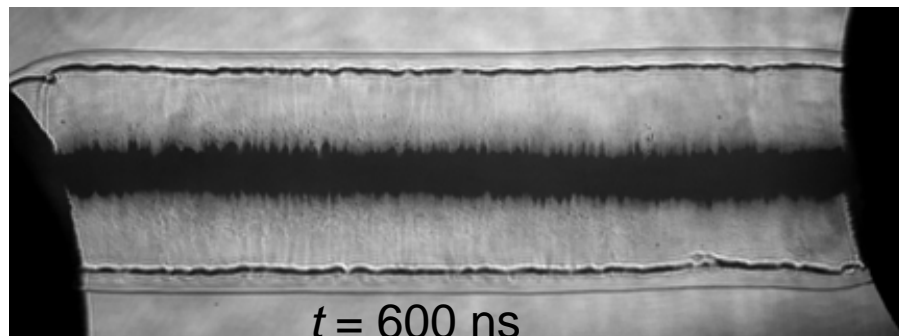


второй сценарий (внутренний пробой)

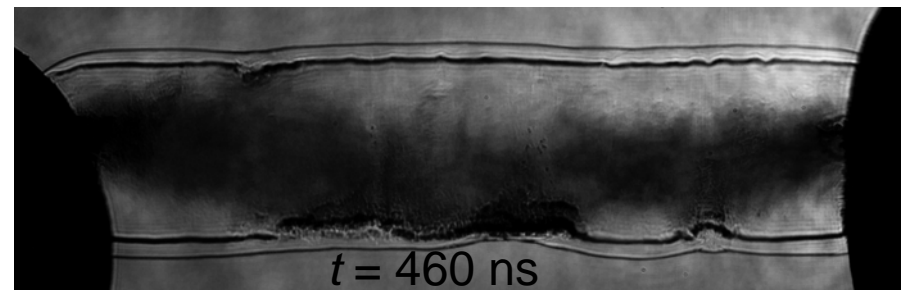
Ag



Ti

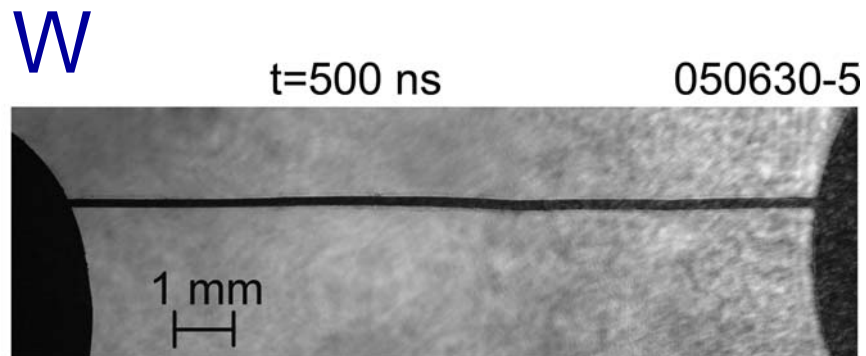


Al

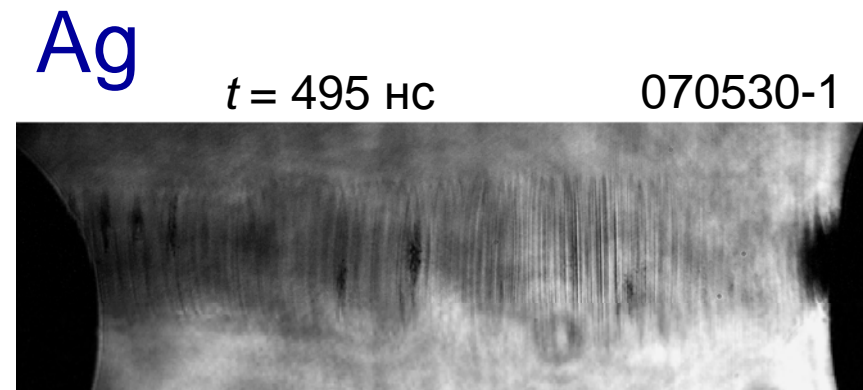
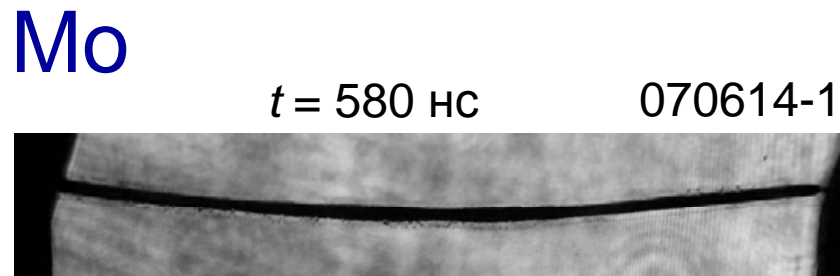
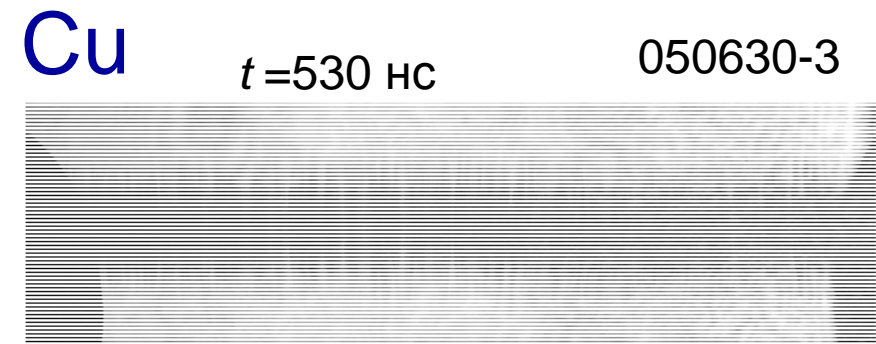


Различные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проволочек в вакууме ($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)

первый сценарий (шунтирующий пробой)



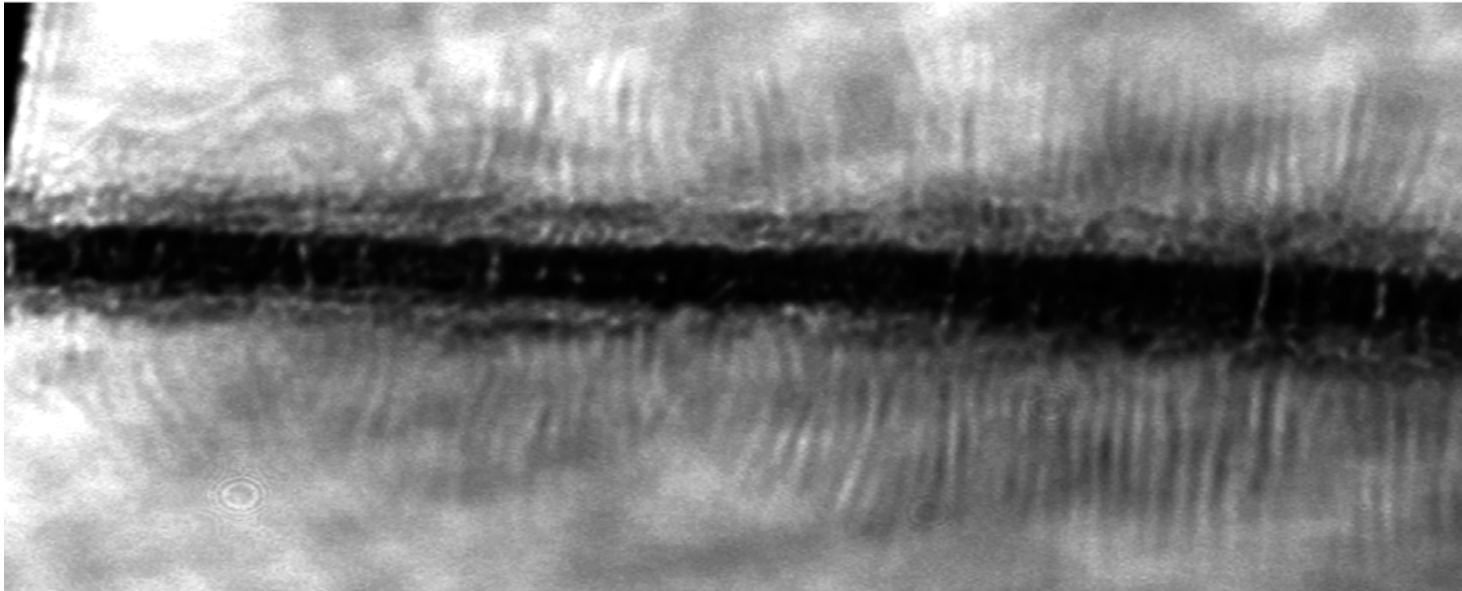
второй сценарий (внутренний пробой)



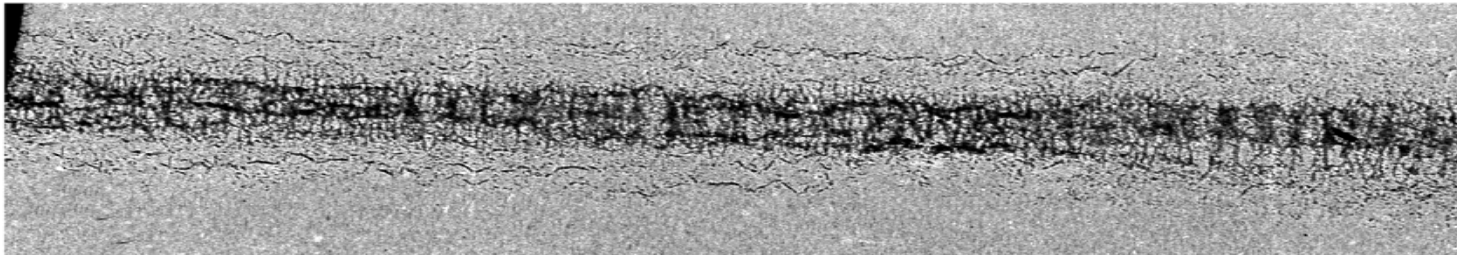
Можно утверждать, что при электрическом взрыве в вакууме развитие вторичного пробоя идёт по аналогичным **двум сценариям**. Так, видно, что расстояние, на которое разлетаются продукты взрыва в случае ЭВП **медной** проволоочки в вакууме, того же порядка, что и в воздухе. Следовательно, можно сделать вывод о том, что и в этом случае **вторичный пробой развивается внутри продуктов взрыва**, при этом диаметр разлёта продуктов взрыва (и в воздухе, и в вакууме) на порядок больше, чем при ЭВП вольфрамовой проволоочки в вакууме. Это отличие обусловлено тем, что при ЭВП **вольфрамовой** проволоочки в вакууме **шунтирующий пробой** происходит на существенно более ранней стадии развития разряда и идёт по десорбированным газам и другим загрязняющим поверхность лёгким веществам; основной канал протекания тока при этом так и остаётся вблизи поверхности плотных продуктов взрыва проволоочки.

Структура канала разряда
при электрическом взрыве Ti проволоочки
($U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)

laser shadow image



x-ray shadow image



ВЫВОДЫ

- значения введенной энергии в продукты взрыва будут сильно различаться, это приведет к существенным различиям реализуемых параметров плазмы;
- различие механизмов переноса тока и темпов разлета скажется на распределении плотного вещества, что, в свою очередь, приведет к большим отличиям в конечном состоянии продуктов взрыва;
- при численном моделировании электрического взрыва проволочек необходимо учитывать различие сценариев вторичного пробоя.

Спасибо за внимание!