



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

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

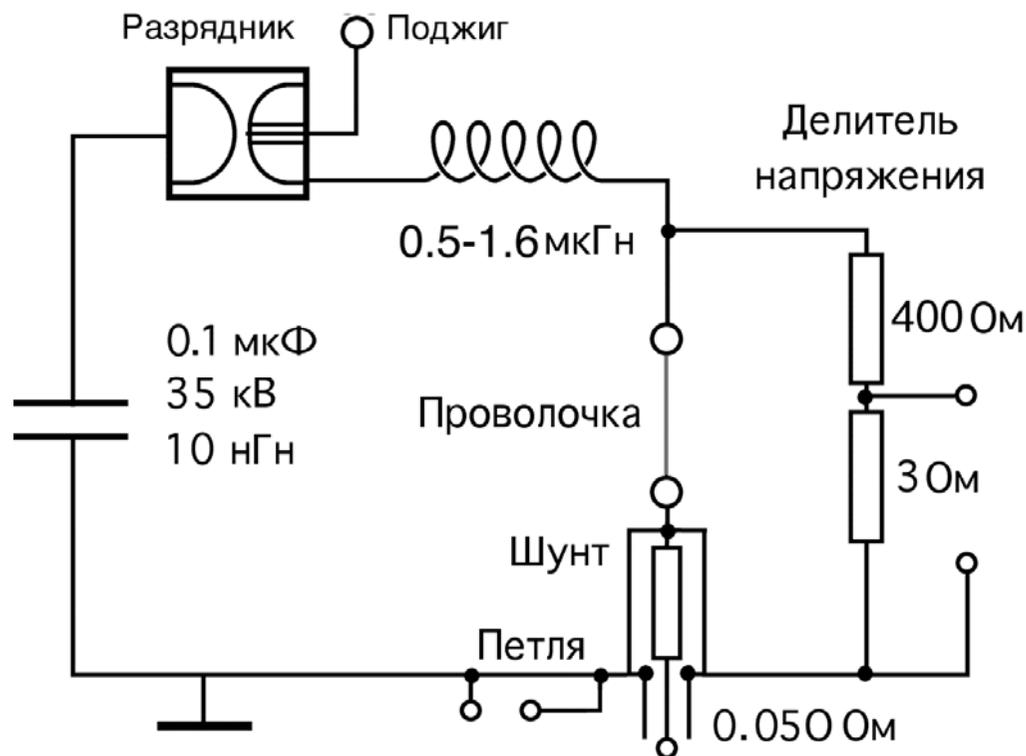
<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур, РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический 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

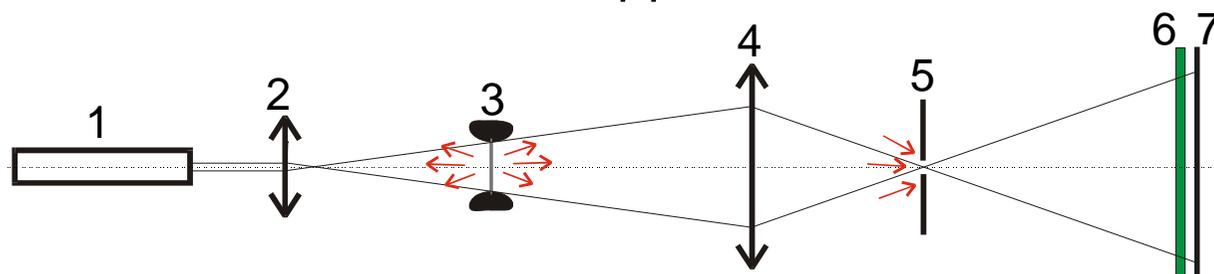
4. Объектив

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

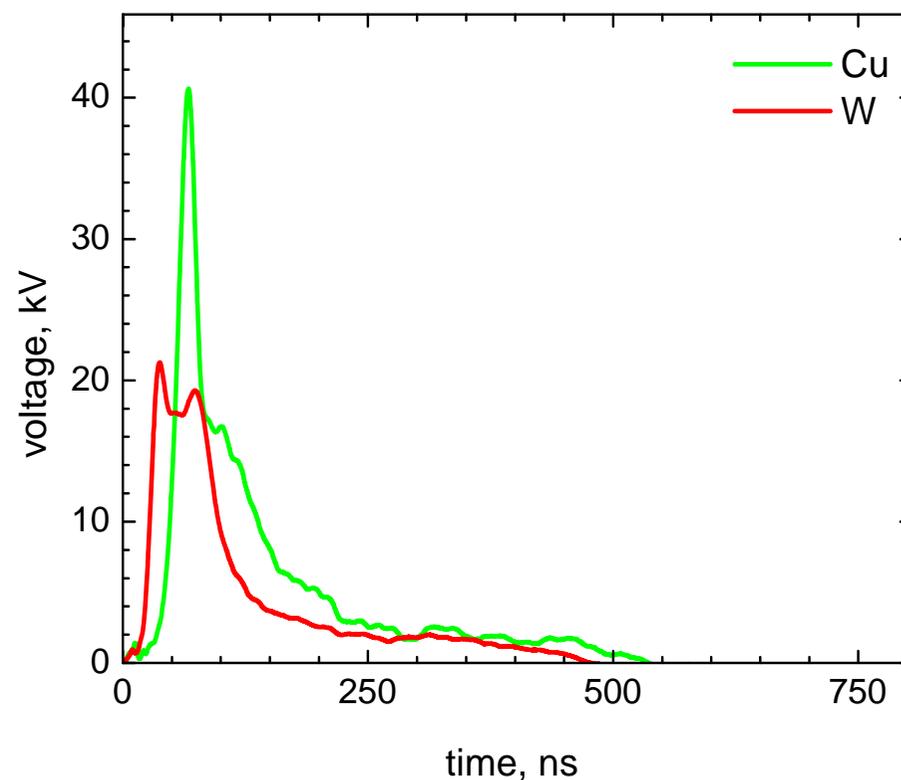
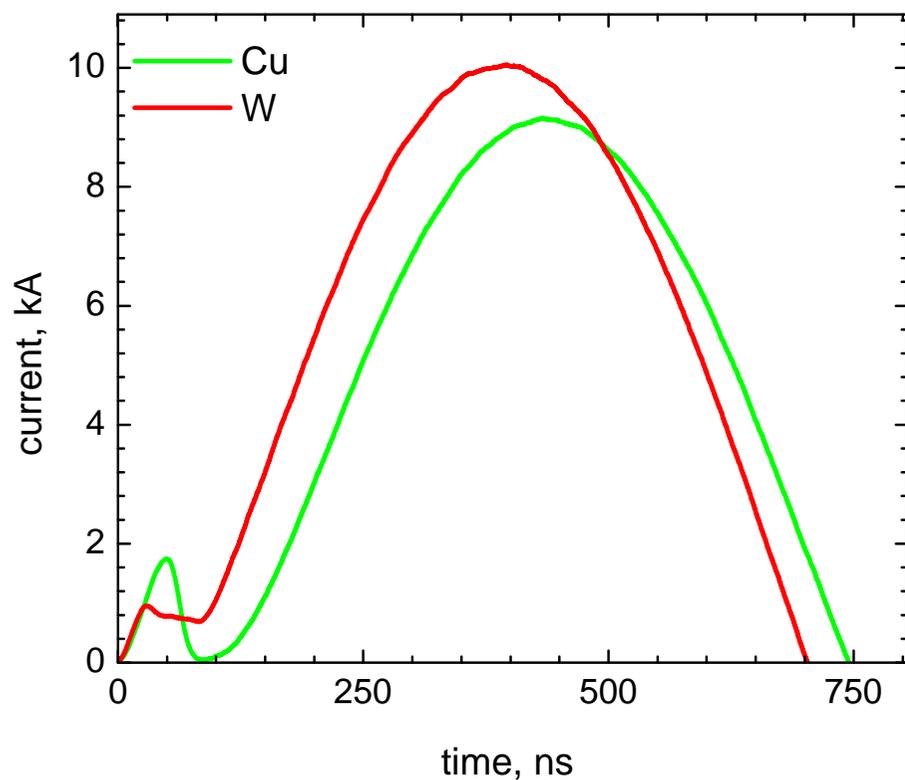
6. Зелёный фильтр СЗС-21

7. Приемник

## схема оптической диагностики



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

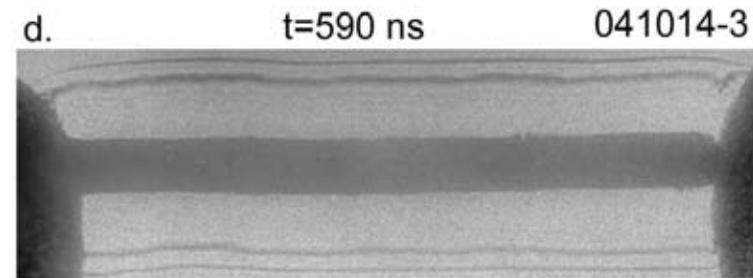
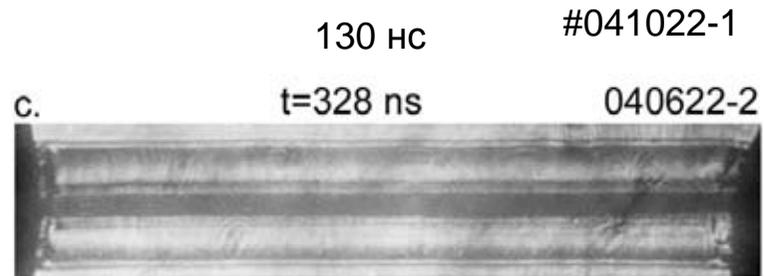
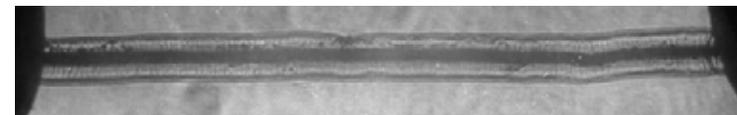
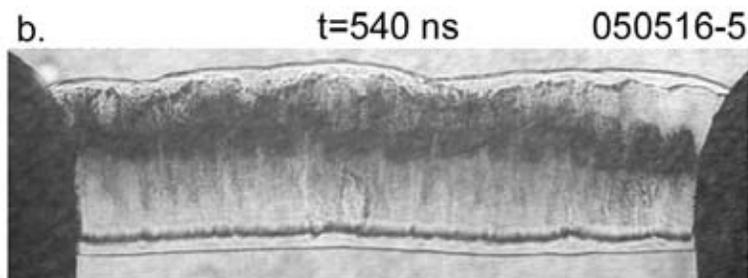
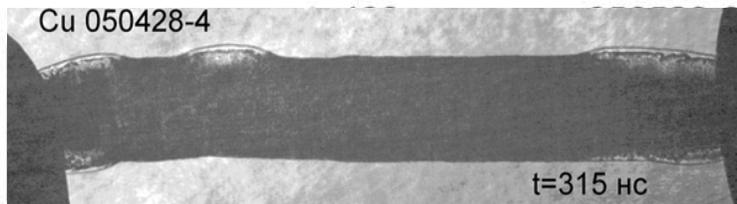
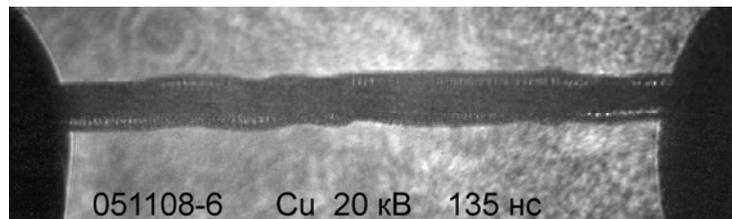


Изображение структуры канала разряда при взрыве 25 мкм  
проволочек ( $l = 12\text{мм}$ )  $U_0 = 20\text{ кВ}$

Cu

В ВОЗДУХЕ

W

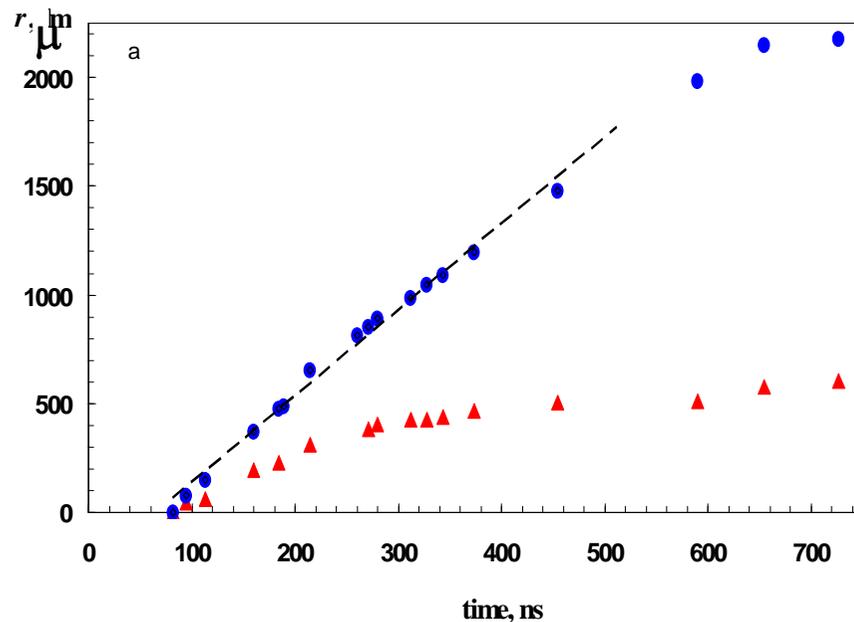


# Формирование ударных волн в воздухе при электрическом взрыве 25-ти мкм проволочек

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 ( $\sim 20$  Дж) и несколько превышает величину энергии, введённой в проволочку к моменту шунтирующего пробоя ( $\sim 1$  и  $0.8$  Дж при взрыве вольфрамовой и медной проволочек)

# Параметры газа за фронтом УВ и ее структура

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

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

$M = D/c_{s0}$  - число Маха;

$c_{s0} = 350 \text{ м/с}$  - 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

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

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

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

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

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

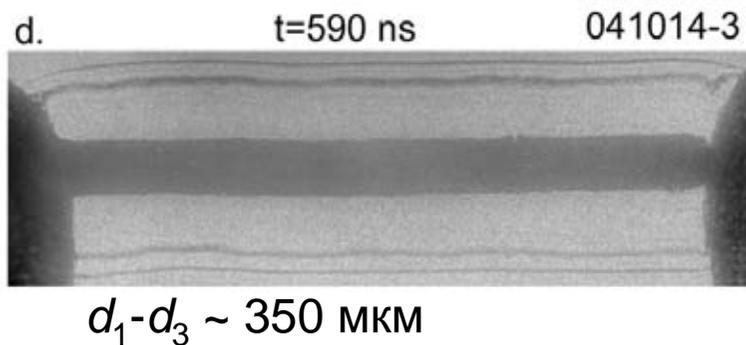
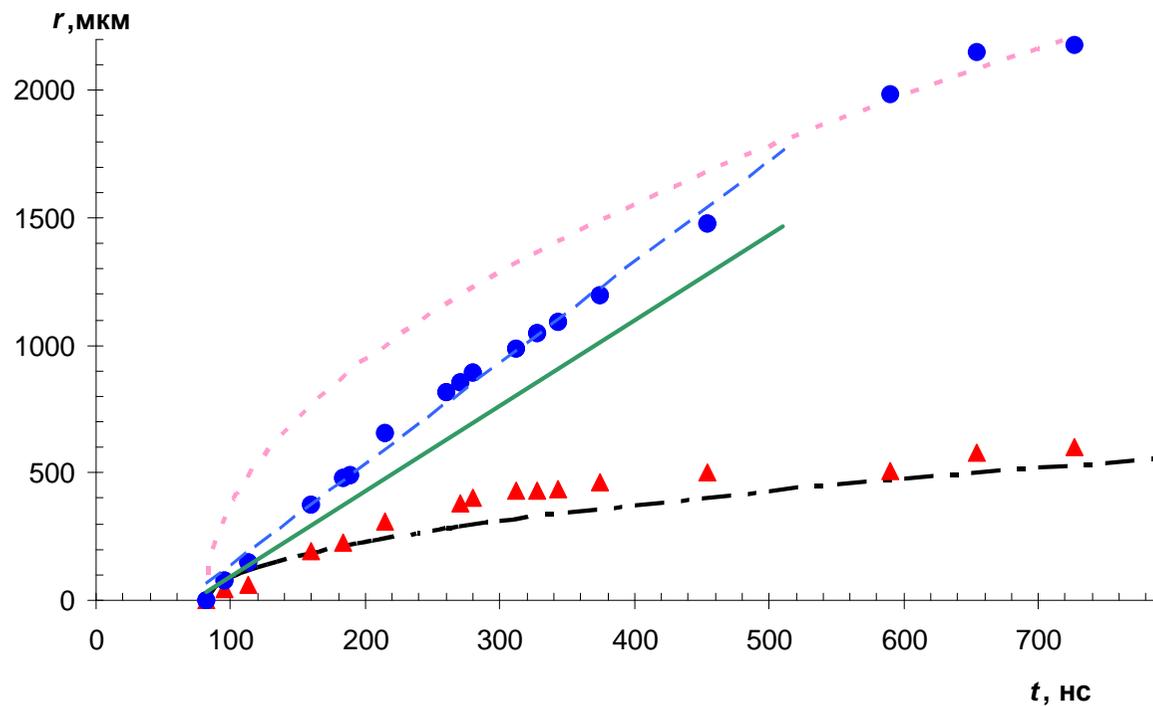
$T_1 = 7.5 \text{ и } 4.8 \text{ кК}$  — температура,

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

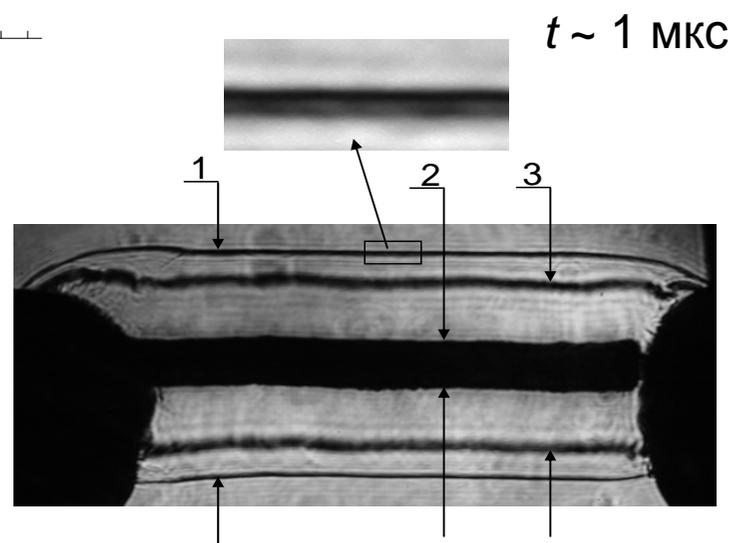
$u_1 = 3.3 \text{ и } 2.7 \text{ км/с}$  — скорость поршня

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

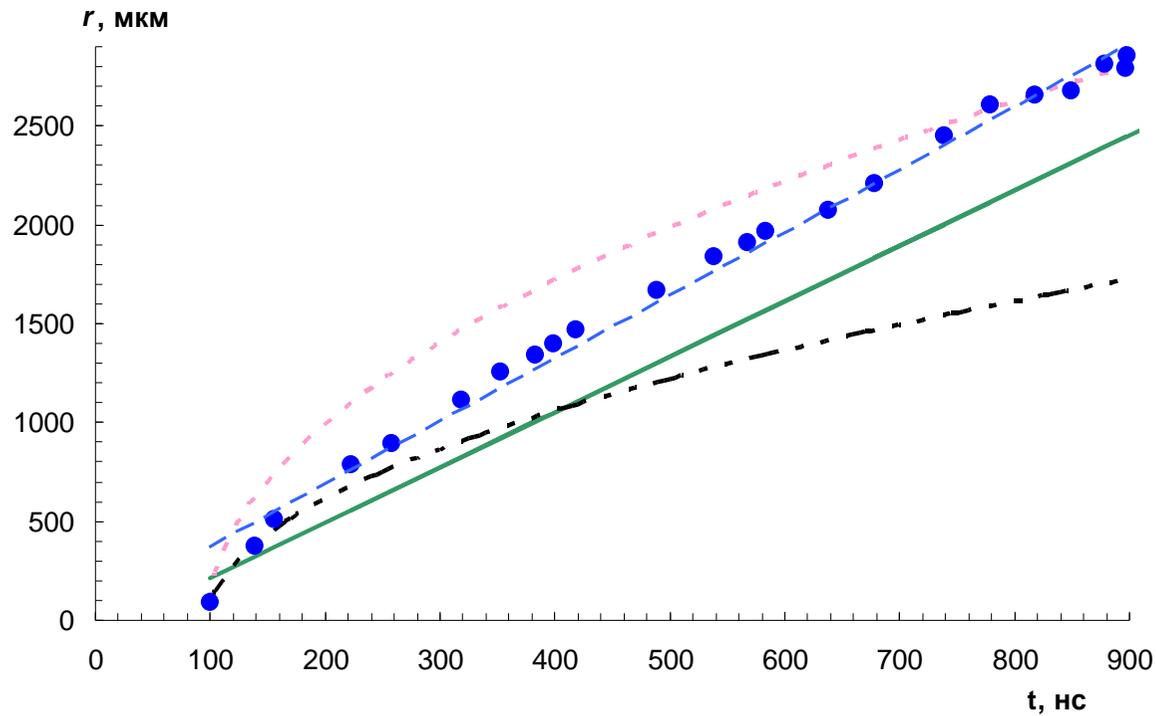
# Структура канала разряда при электрическом взрыве W проволоочки ( $U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)



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



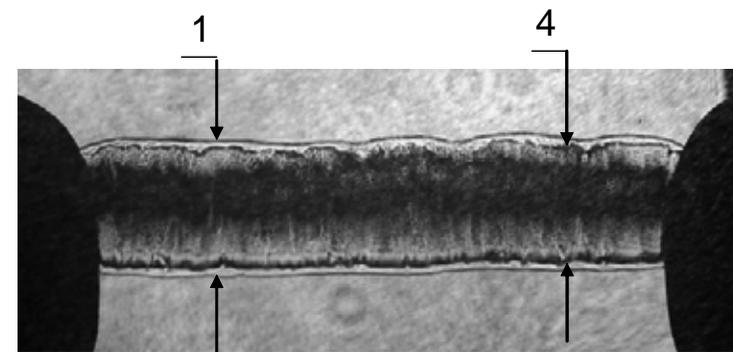
# Структура канала разряда при электрическом взрыве Cu проволоочки ( $U_0 = 20$ кВ, $l = 12$ мм, $d = 25$ мкм)



$t = 415$  нс

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

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



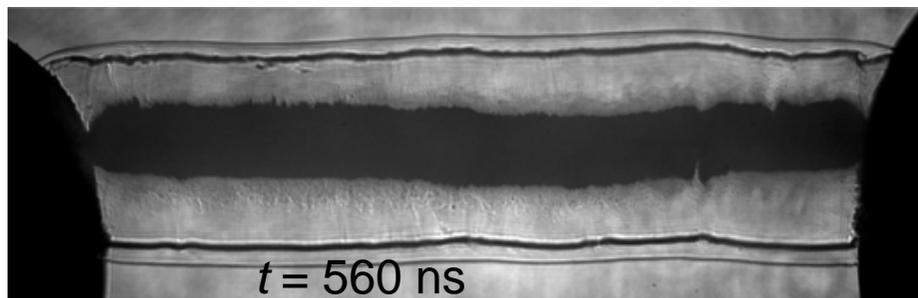
Можно утверждать, что при электрическом взрыве проволочек в воздухе возможно развитие вторичного пробоя (разряда) межэлектродного промежутка по **двум сценариям**

- 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)

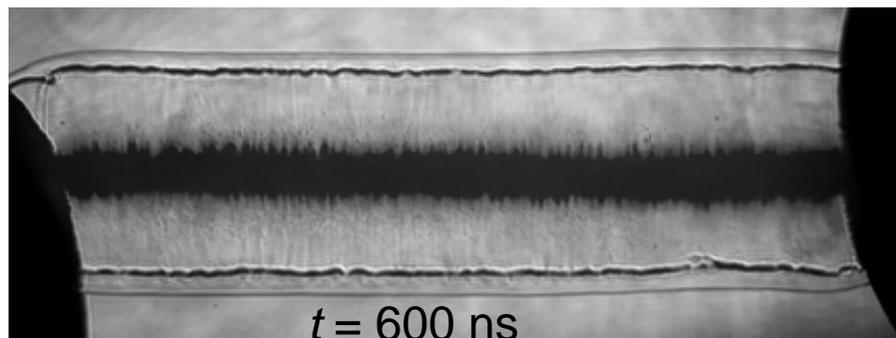
первый сценарий (шунтирующий пробой)

Mo



070315-6

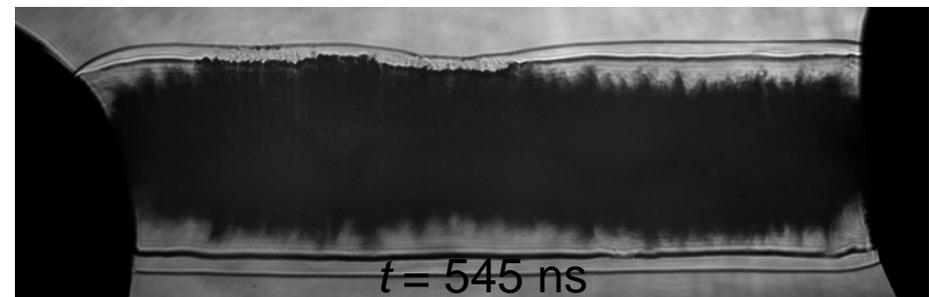
Ti



070321-3

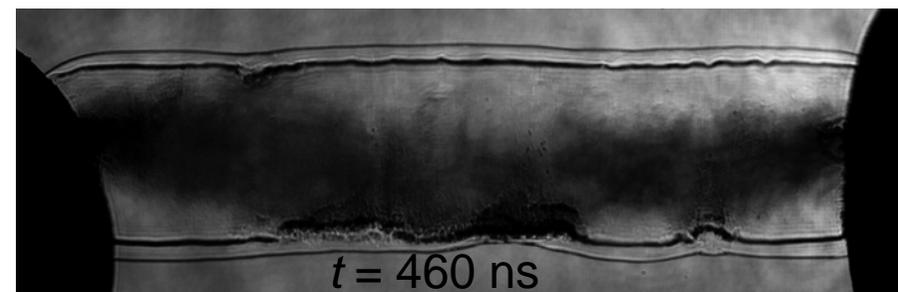
второй сценарий (внутренний пробой)

Ag



070326-7

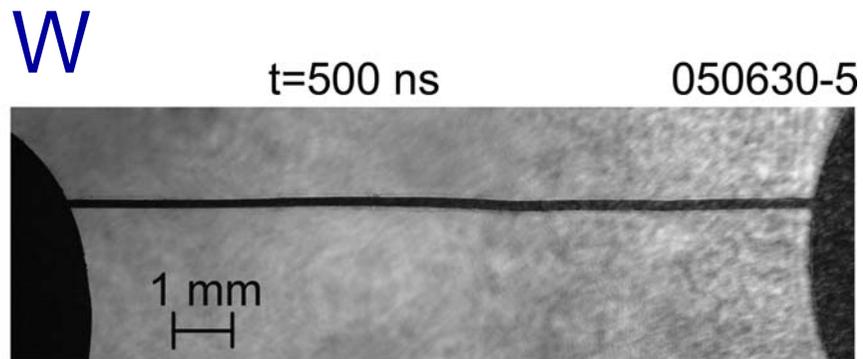
Al



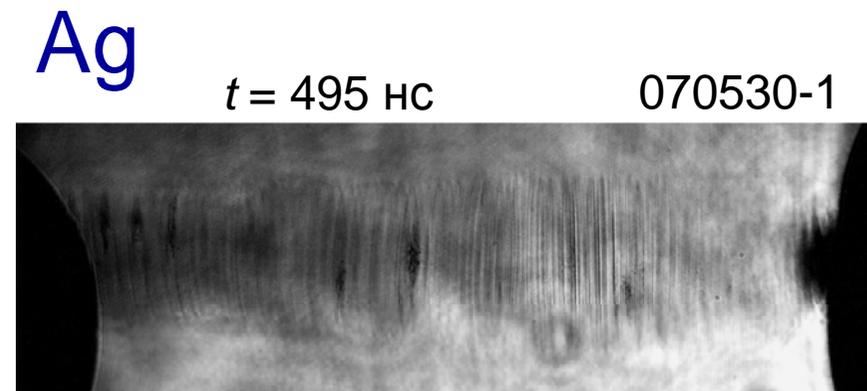
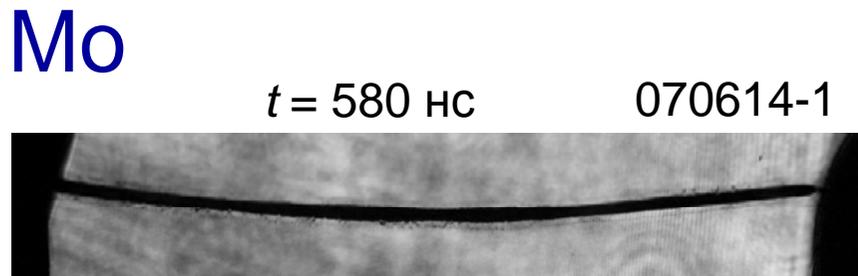
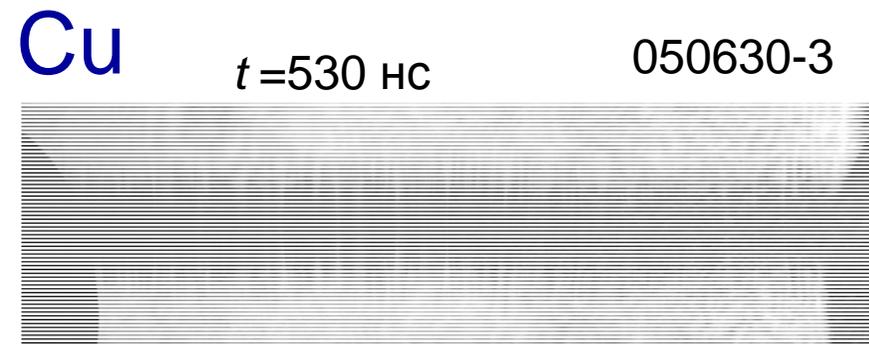
070329-2

# 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)



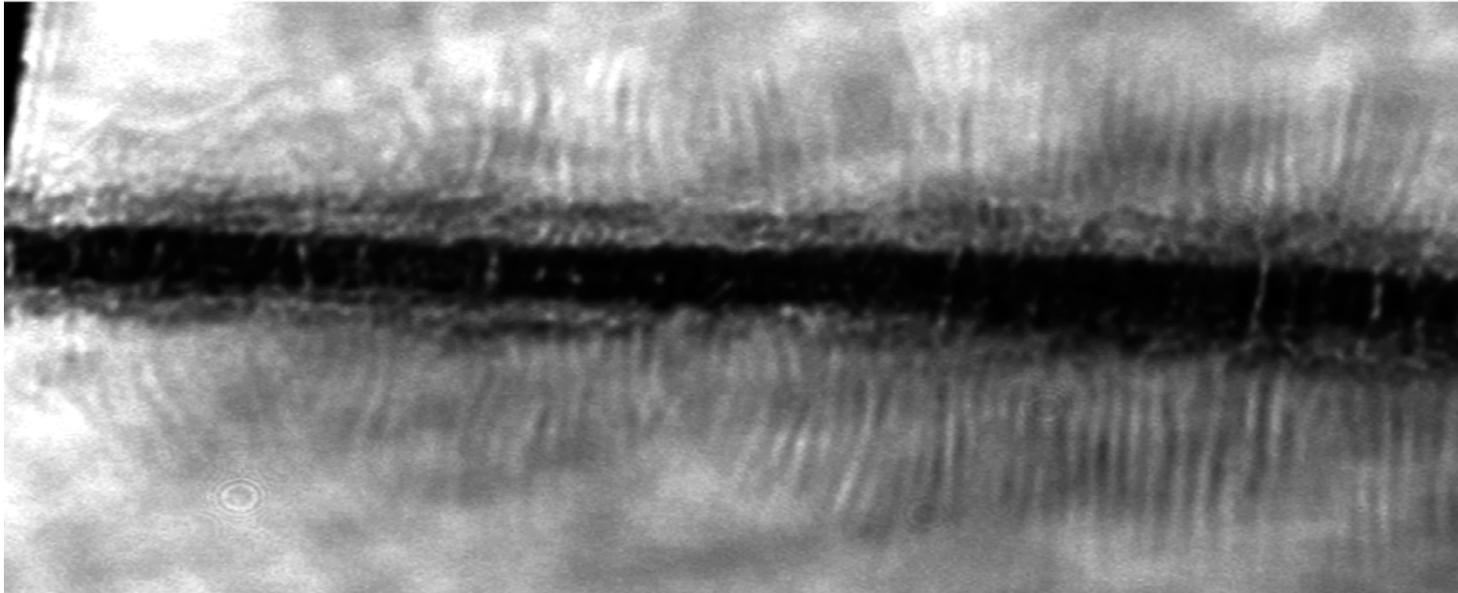
второй сценарий (внутренний пробой)



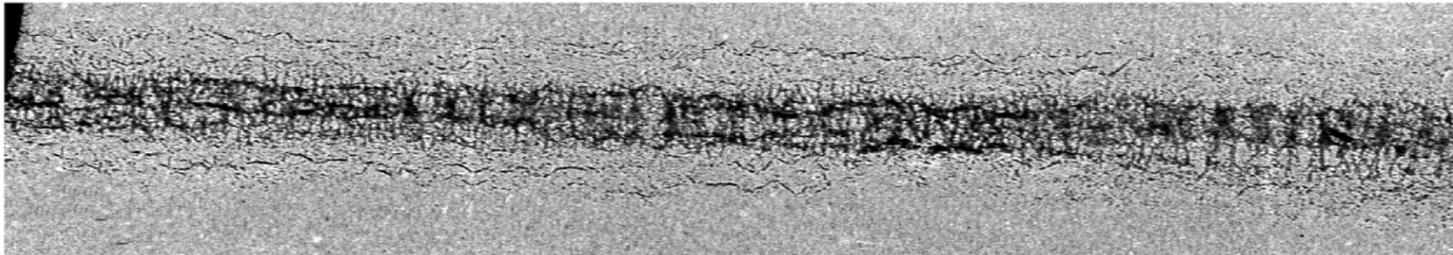
Можно утверждать, что при электрическом взрыве в вакууме развитие вторичного пробоя идёт по аналогичным **двум сценариям**. Так, видно, что расстояние, на которое разлетаются продукты взрыва в случае ЭВП **медной** проволоочки в вакууме, того же порядка, что и в воздухе. Следовательно, можно сделать 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!**