

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МИКРОПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

С.В. Барухостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев, * В.П. Тараканов, ** С.И. Ткаченко, Е.А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: nbv@ami.uran.ru

* Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

** Московский физико-технический институт (университет), Долгопрудный

Цель предлагаемой работы - экспериментальное исследование особенностей генерации идеальной плазмы при воздействии на микропроводники электромагнитного импульса (ЭМИ) с субнаносекундным фронтом. Генератор высокочастотных импульсов напряжения «РАДАН-220» (с волновым сопротивлением $Z_w = 50 \Omega$) разряжался на неоднородную коаксиальную линию (вакуумную камеру) длиной 15 см и диаметром 10 см. В центральную жилу линии включались медные ($d = 20-300 \mu\text{m}$), никелевые ($d = 25 \mu\text{m}$) и вольфрамовые ($d = 24.5-100 \mu\text{m}$) проволоки длиной $l = 5-15$ мм. Амплитуда импульса напряжения $-U_0 = 220$ кВ; длительность фронта $-t_f = 200-500$ пс; запасенная энергия в генераторе $-W = 1$ Дж. Давление в камере $-P = 10^{-4}-760$ Торр. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло. Электрический ток в конце линии измерялся с помощью шунта, имеющего сопротивление $R_s = 0.4 \Omega$ и полосу пропускания 5 ГГц. Сигналы с делителя и шунта регистрировались четырехканальным цифровым осциллографом Tektronix с полосой пропускания 1 ГГц. Кроме этого, производилась съемка собственного свечения канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon 450D и Canon 5D Mark II; его непрерывная развертка с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173 и коаксиального фотоэлектронного диода (ФЭК) СПУ-22М; регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173.



Рис. 1. Экспериментальная установка с системой для макросъемки.

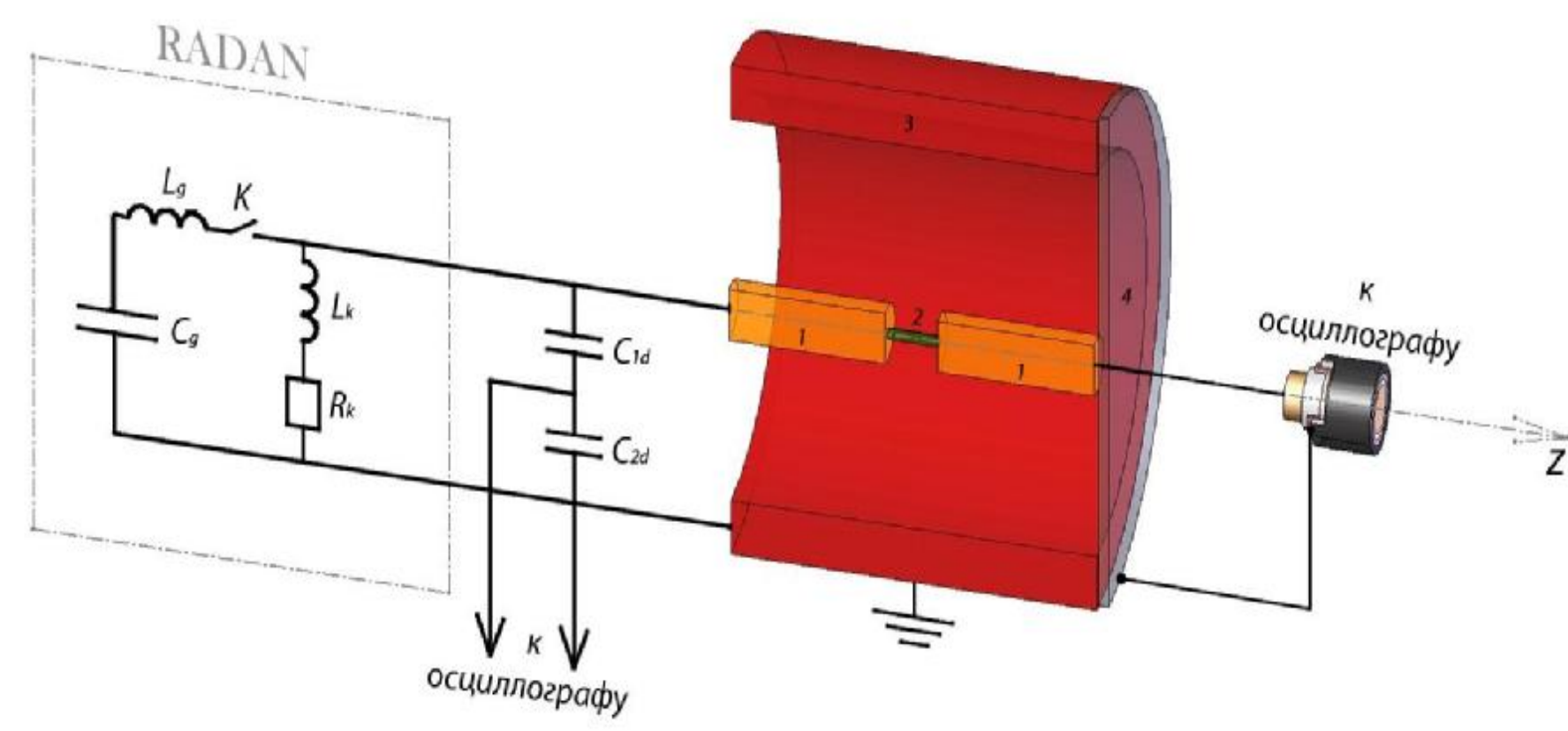


Рис. 2. Схема измерения напряжения на входе линии и тока разряда.

1-2-1 - центральная жила ($l = d = 1.5$ мм, $l = 7.25$ см; 2 - микропроводник: $d = 20-300$ мкм, $l = 5-15$ мм); 3 - обратный токопровод с $d = 10$ см и $l = 15$ см; 4 - шунт с $R_{sh} = 0.4 \Omega$ и полосой пропускания 5 ГГц. $L_0 = 103.306$ мГн, $C_0 = 41.322$ пФ - индуктивность и емкость формирующей линии ГИИ; К - газовый разрядник под давлением 40 атм, срабатывающий без поджига при достижении напряжения на формирующей линии 220 кВ; $L_p = 378$ мГн, $R_p = 81.53 \Omega$ - индуктивность и сопротивление конструктивной катушки, включенной в конце ГИИ; C_{d1} , C_{d2} - емкости делителя напряжения.

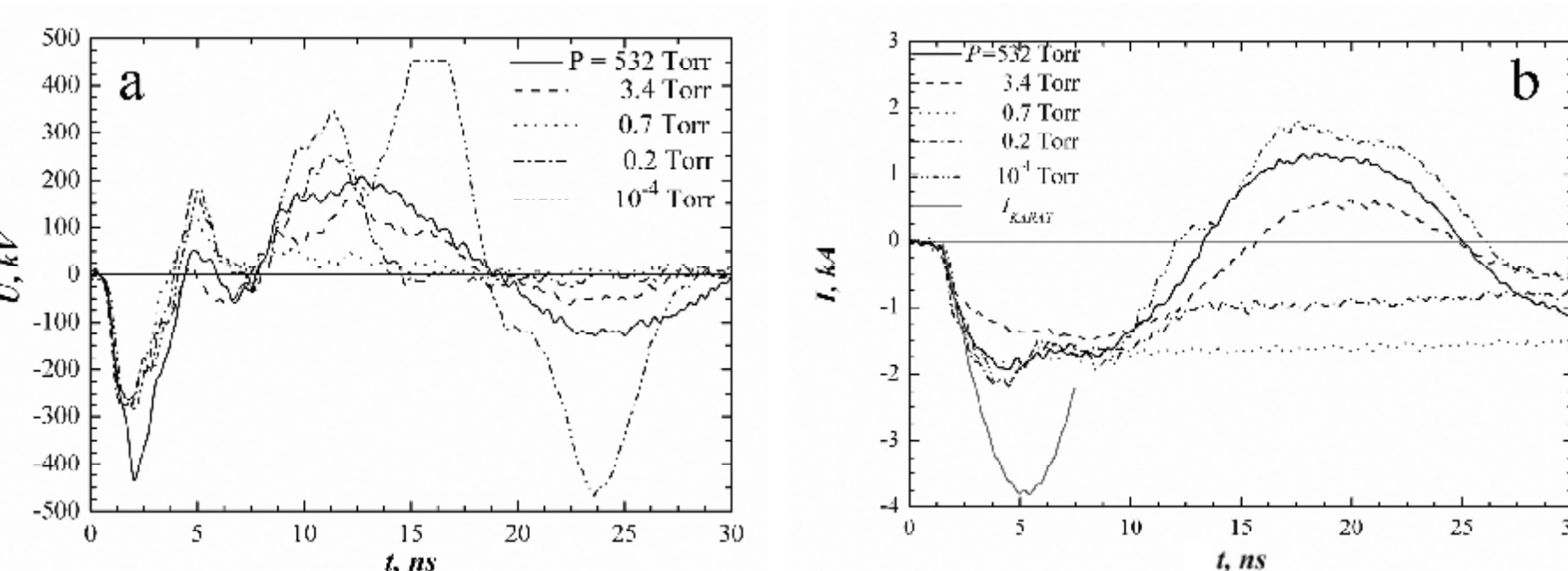


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) для различных значений давления в камере и соответствующие им фотографии свечения канала разряда. (с) - 532 Torr; (д) - 3.4 Torr; (е) - 0.7 Torr; (ф) - 0.2 Torr; (г) - 10^{-4} Torr.

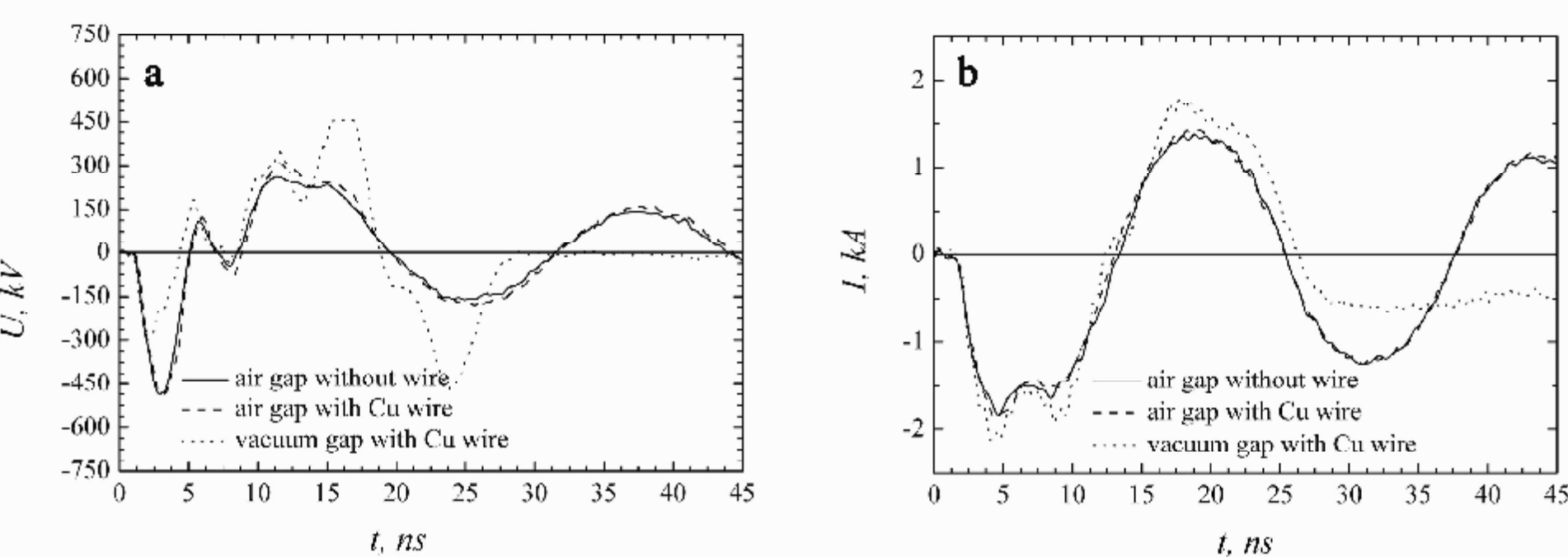


Рис. 4. Сравнение процесса формирования плазменного канала при разомкнутом и замкнутом медной проволокой воздушном промежутке $l = 5$ мм и замкнутом вакуумном промежутке.

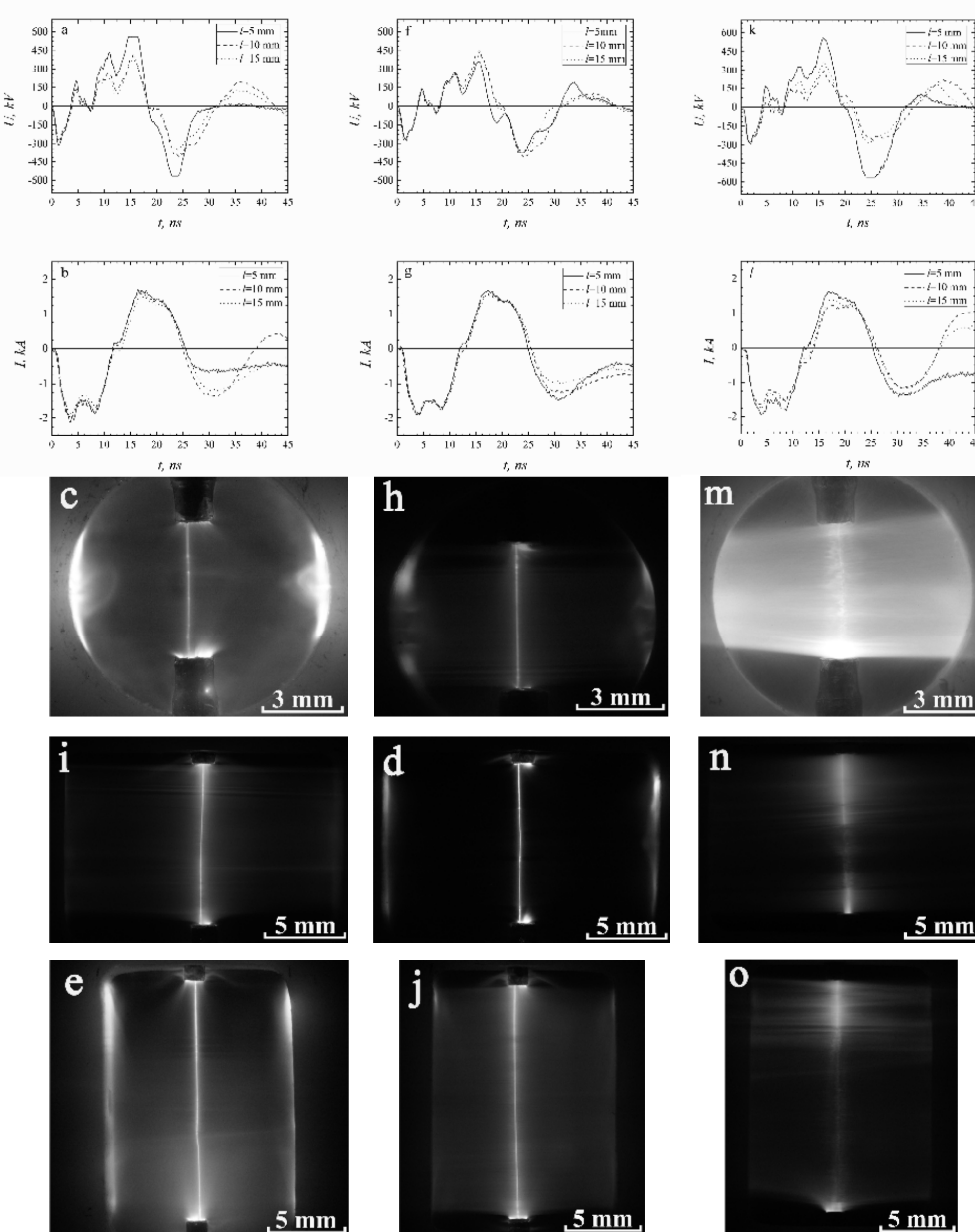


Рис. 5. Влияние длины проволоки на структуру свечения плазменного канала: (а)-(е) - Cu, (ф)-(j) - Ni; (к)-(о) - W проволочки; с, h, m - $l = 5$ мм; d, i, n - $l = 10$ мм; e, j, o - $l = 15$ мм. Давление в вакуумной камере 10^{-4} Торр.

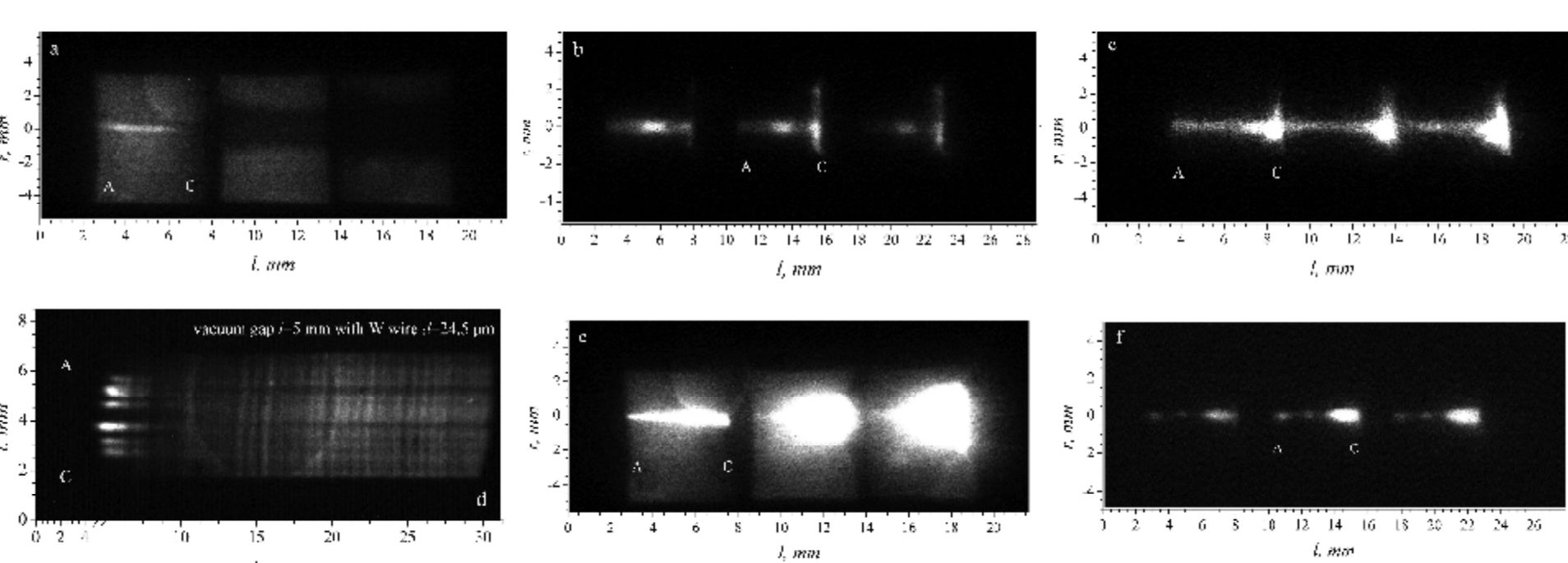


Рис. 6. Сравнение изображений разрушения микропроводников: Cu, $d = 20 \mu\text{m}$ (а, б, с, г, h) и W, $d = 24.5 \mu\text{m}$ (д, е, ф, i, j).

Экспозиция снимков: а, е - (25, 31, 32) нс, подсветка ИСШ-400, интервал между серединами кадров $\Delta t = 77$ нс; б, ф - (3, 6, 3, 3, 0) нс, $\Delta t = 5.25$ нс; с - (0, 8, 0, 8, 0) нс, $\Delta t = 1.254$ нс; г, i - интегральные снимки; h, j - снимки продуктов «взрыва», нанесенных на диэлектрическую подложку в единичном эксперименте.

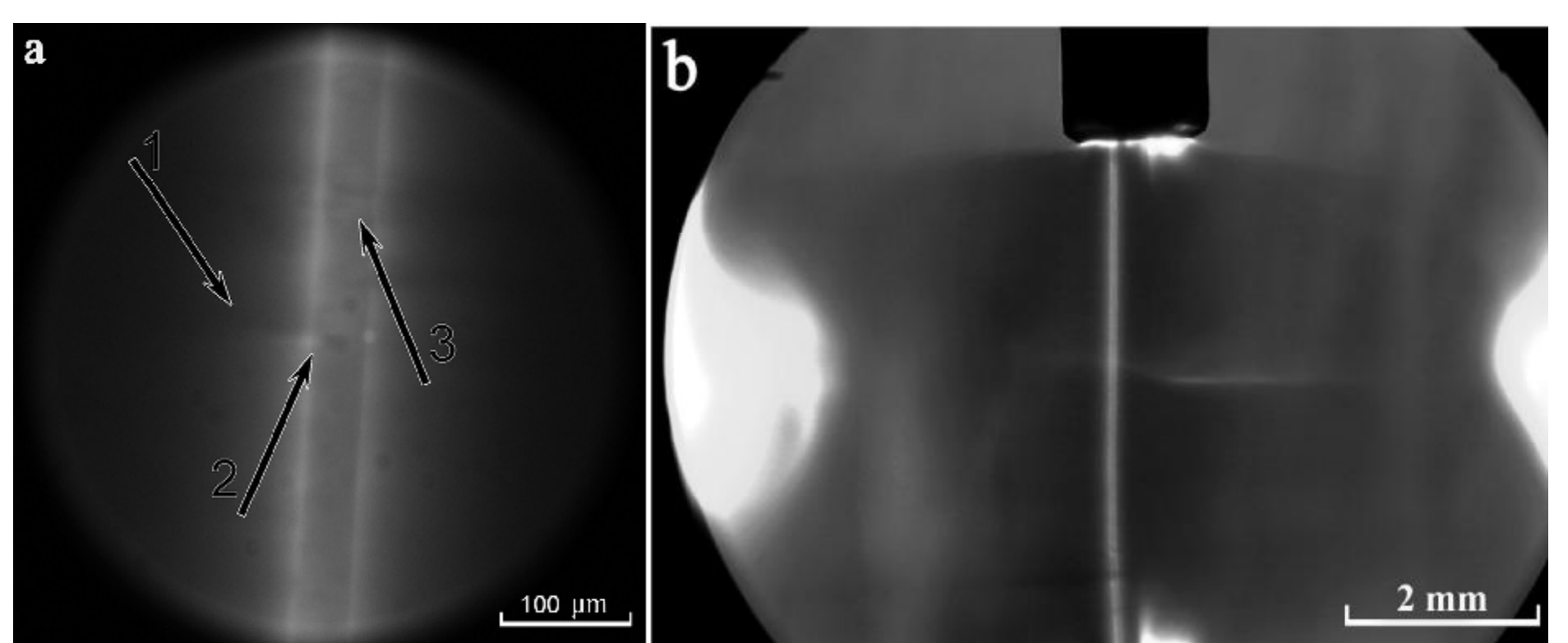


Рис. 7. Макроснимки структуры плазменного канала, образованного в разряде на медную проволочку: а - тридцатикратное увеличение; б - подсветка от ИСШ-400. 1 - корона, 2 - переходная область, 3 - ядро.

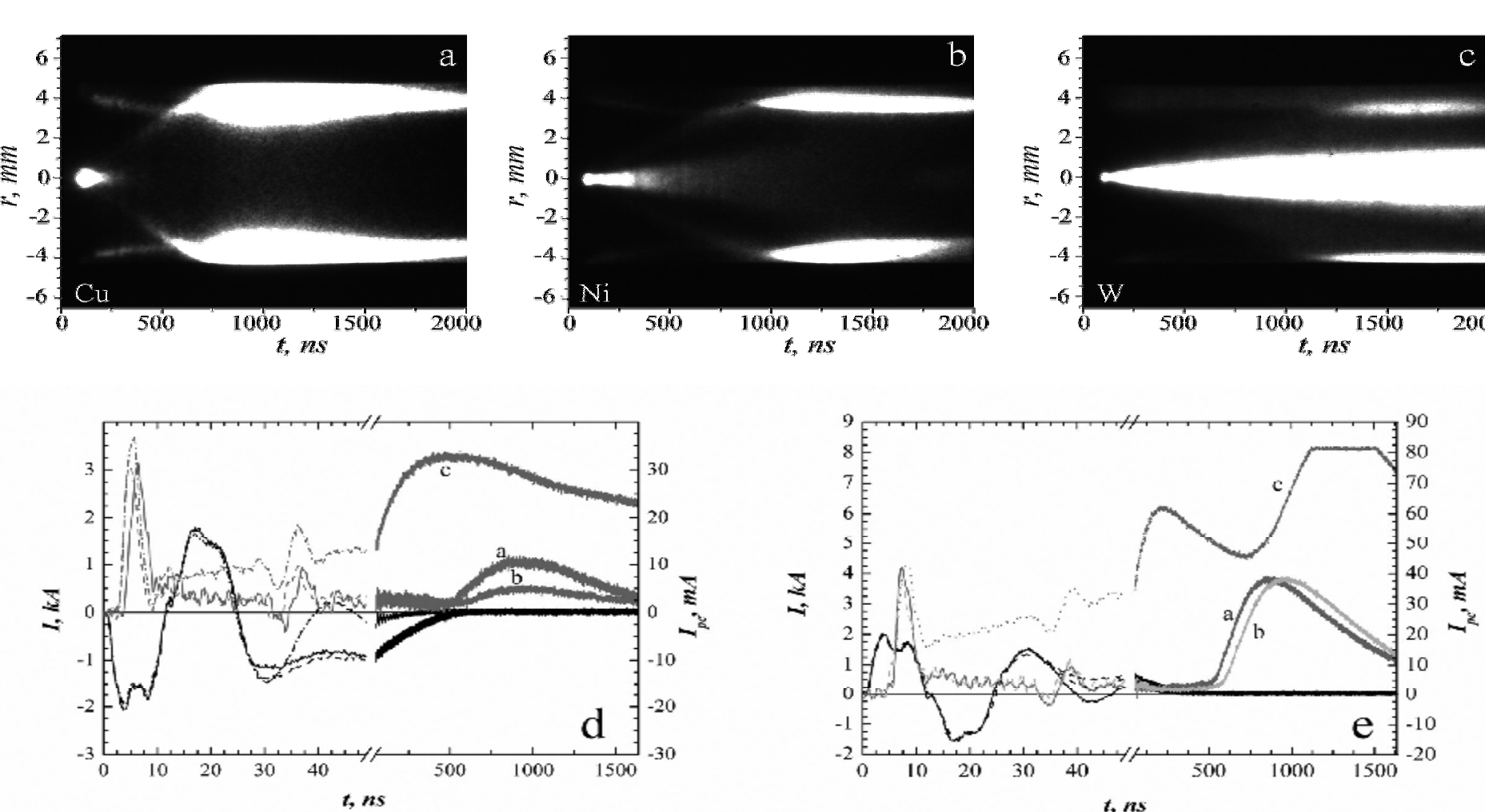


Рис. 8. Временные развертки свечения плазменного канала (а, б, с) и осциллограммы тока и фототока с ФЭК для отрицательной (д) и положительной (е) полярности зарядного напряжения.

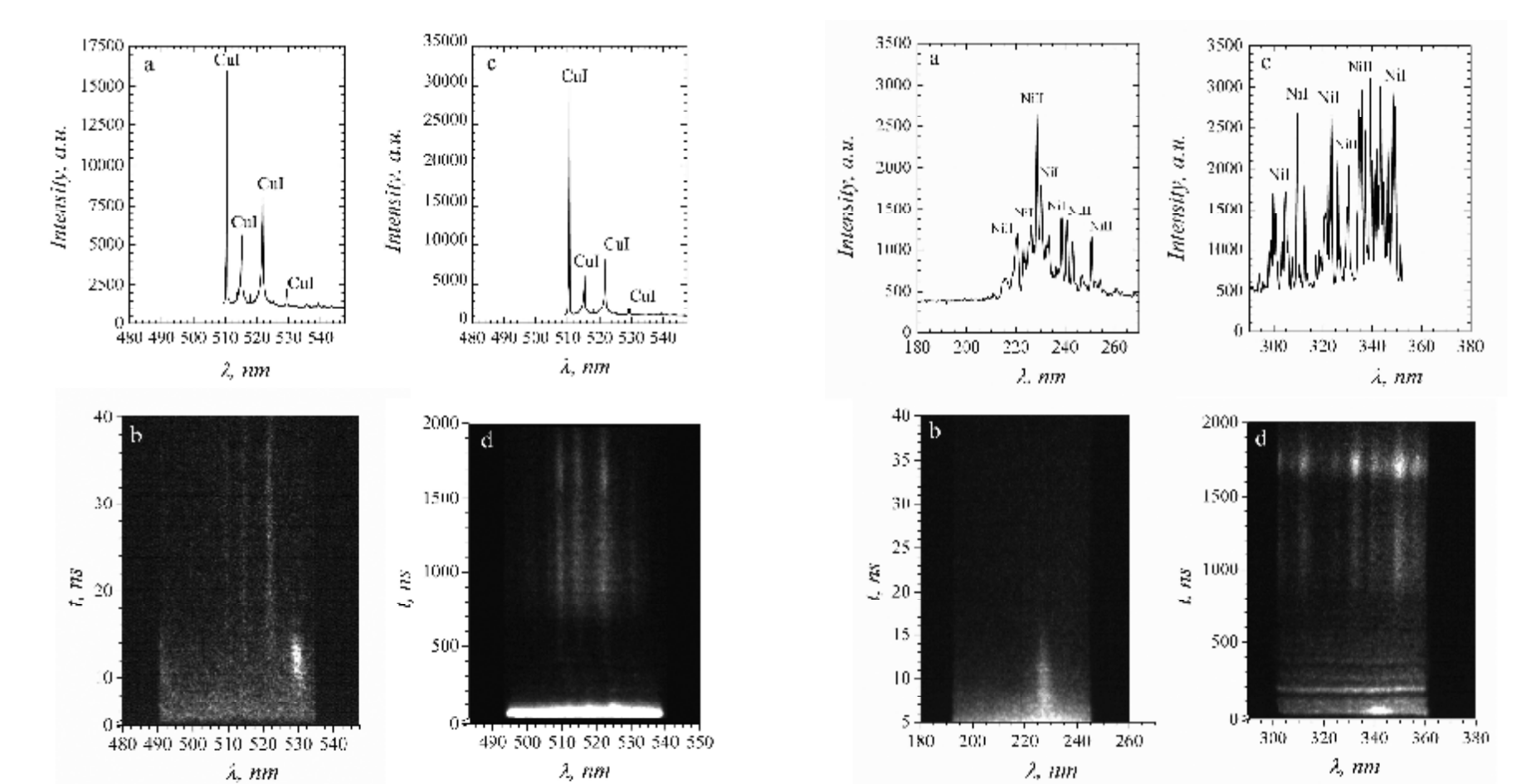


Рис. 9. Наиболее интенсивные линии атомов меди (510.554, 515.324, 521.82) нм при отрицательной (а) и положительной (б) полярности зарядного напряжения и их временная развертка (в, д) при положительной полярности зарядного напряжения.

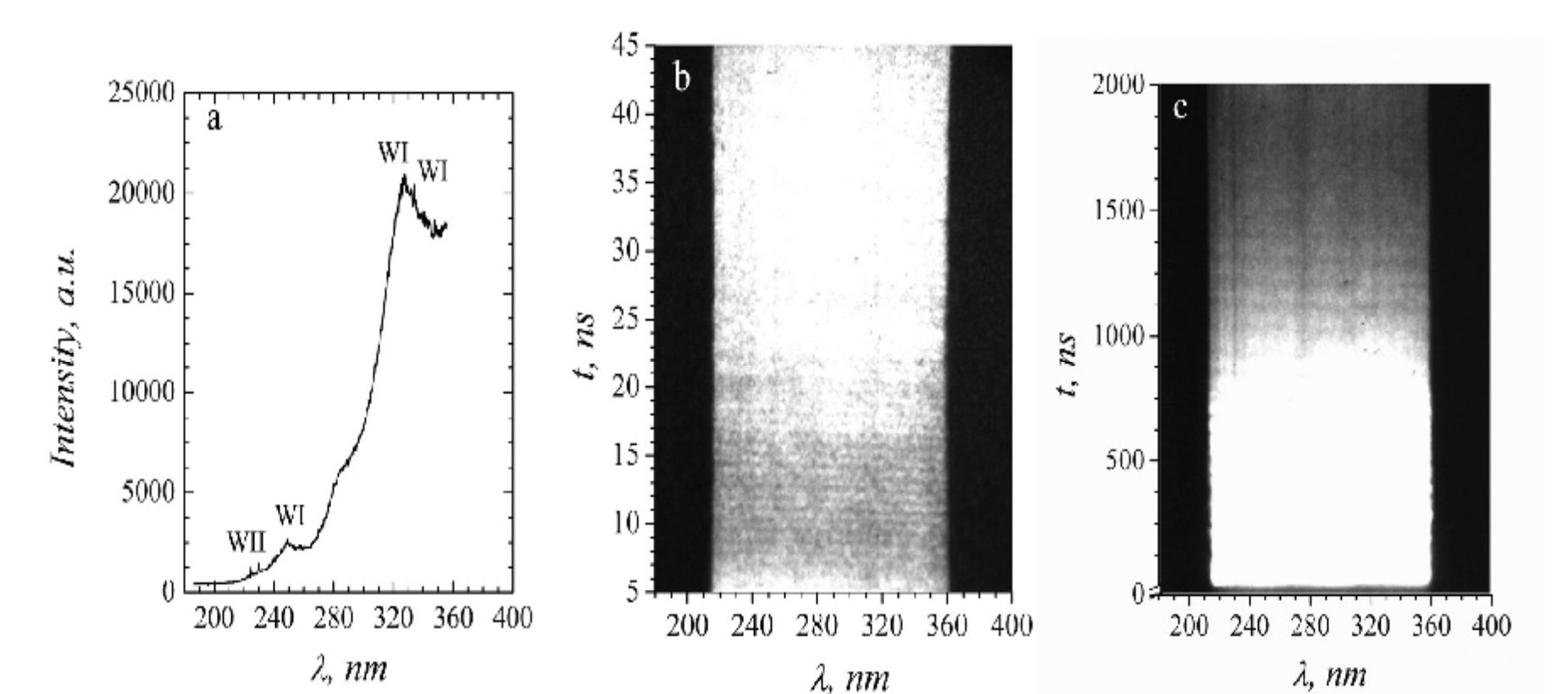


Рис. 10. Спектр излучения никелевой плазмы (а, с) (510.554, 515.324, 521.82) нм и его временная развертка (б, д) при положительной полярности зарядного напряжения.

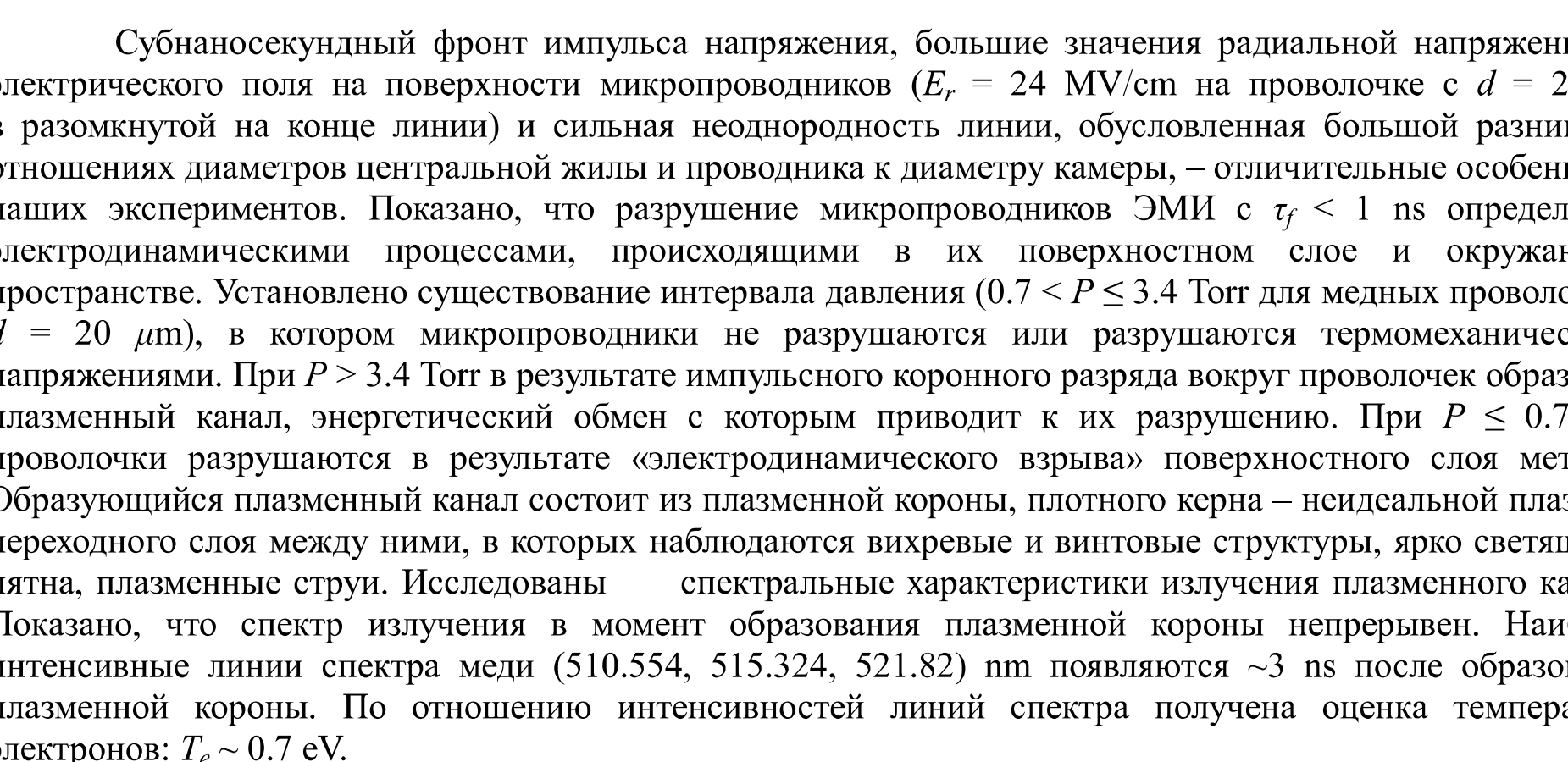


Рис. 11. Спектр излучения вольфрамовой плазмы (а) и его временная развертка (б, с) при положительной полярности зарядного напряжения.

Субнаносекундный фронт импульса напряжения, большие значения радиальной напряженности электрического поля на поверхности микропроводников ($E_r = 24$ MV/cm на проволочке с $d = 20 \mu\text{m}$ в разомкнутой на конце линии) и сильная неоднородность линии, обусловленная большой разницей в отношениях диаметров центральной жилы и проволоки к диаметру камеры, - отличительные особенности наших экспериментов. Показано, что разрушение микропроводников ЭМИ с $t_f < 1$ нс определяется электродинамическими процессами, происходящими в их поверхностном слое и окружающем пространстве. Установлено существование интервала давления ($0.7 < P \leq 3.4$ Торр для медных проволочек с $d = 20 \mu\text{m}$), в котором микропроводники не разрушаются или разрушаются термомеханическими напряжениями. При $P > 3.4$ Торр в результате импульсного коронного разряда вокруг проволочки образуется плазменный канал, энергетический обмен с которым приводит к их разрушению. При $P \leq 0.7$ Торр проволочки разрушаются в результате «электродинамического взрыва» поверхностного слоя металла. Образующийся плазменный канал состоит из плазменной короны, плотного ядра - неидеальной плазмы и переходного слоя между ними, в которых наблюдаются вихревые и игольчатые структуры, ярко светящиеся пятна, плазменные струи. Исследования спектральных характеристик излучения плазменного канала. Показано, что спектр излучения в момент образования плазменной короны непрерывен. Наиболее интенсивные линии спектра меди (510.554, 515.324, 521.82) нм появляются ~ 3 нс после образования плазменной короны. По отношению интенсивностей линий спектра получена оценка температуры электронов: $T_e \sim 0.7$ эВ.

[1] С.В. Барухостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков и др. Письма в ЖЭТФ, 2011. Т.94. С.590.

Оценки

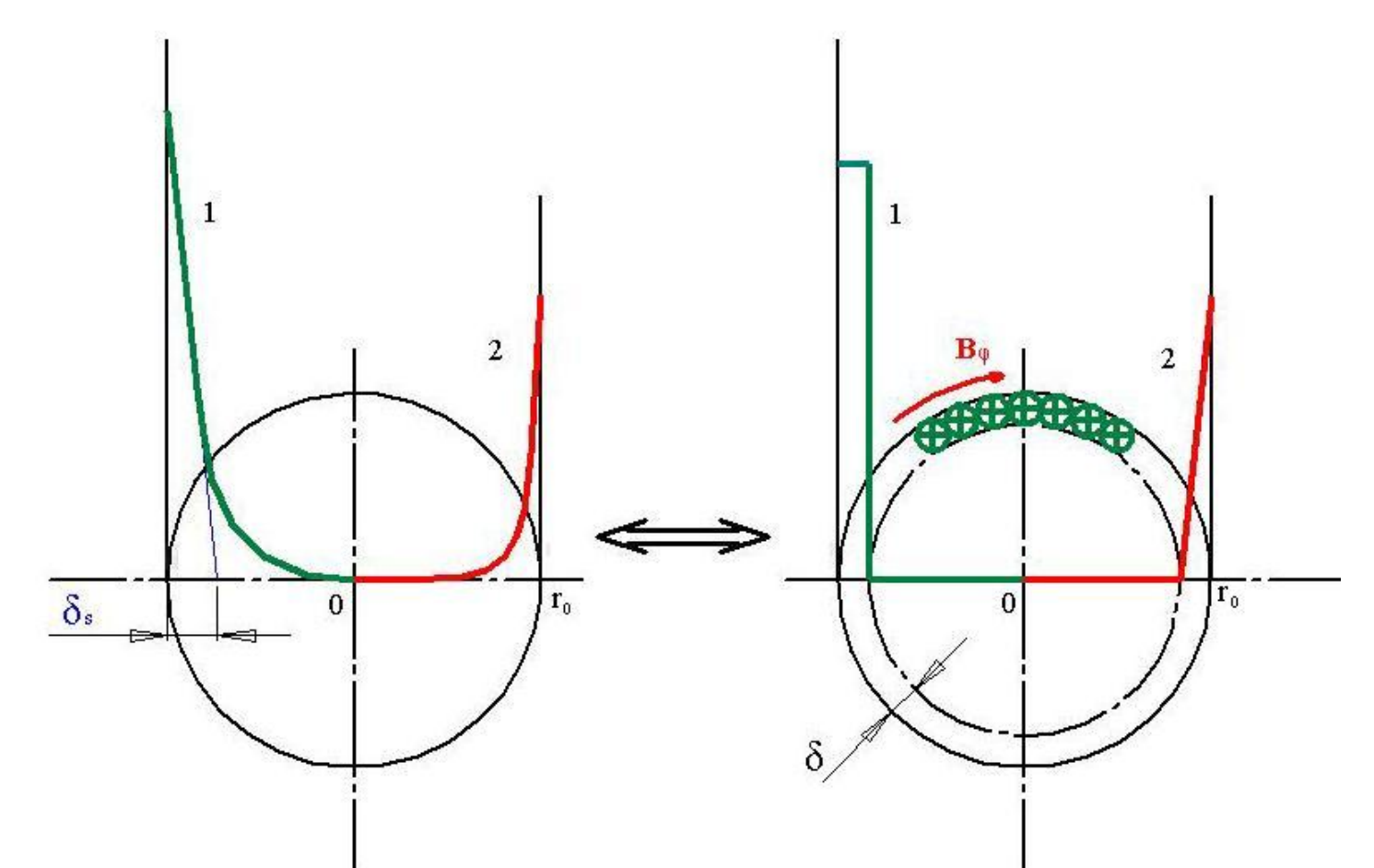


Рис. 12. Возможная качественная картина преобразования распределения плотности тока и индукции магнитного поля в результате электрического взрыва поверхностного слоя металлической проволочки: 1 - $j_s(r)$; 2 - $B_s(r)$.

1. Условие для тока:

$$2\pi \int_0^{\delta} r j(r) dr = 2\pi \int_0^{\delta} r j_s dr = 2\pi j_s r_0 \delta = I_s \Leftrightarrow j_s = \frac{I_s}{2\pi r_0 \delta}$$

2. Условие, необходимое для взрыва поверхностного слоя толщиной δ

$$t_n = t_s \Leftrightarrow \frac{\rho C_s^2 \sigma}{2j_s^2} = \frac{\delta}{C_s} \Rightarrow \frac{I_s^2}{\rho C_s^3 \sigma^3 r_0^2}$$

Для Cu и

$$I_s = 2.2 \text{ kA} \Rightarrow \delta = 0.157 \mu\text{m}, j_s = 2.23 \cdot 10^{10} \text{ A/cm}^2, t_s = 80.5 \text{ ps} \cdot \text{J}$$

Объем слоя, в котором выполняются необходимые условия для взрыва:

$$V = 2\pi r_0 \delta l = 2\pi \cdot 10^{-5} \cdot 1.57 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4.932 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$$

Энергия, необходимая для взрыва слоя:

Значение концентрации электронов, имеющих максимальную скорость в вырожденной электронной плазме $V_F = 0.157$ см/пс, равно:

$$n_e^* = j_s / (ev) = 2.787 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

Видно, что

$$n_e^* \ll n_{e0} = 8.45 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} !!!$$

С другой стороны, заряд Q , при котором энергия связи на один атом станет равной энергии кулоновского взаимодействия: $Q = 0.586e$ для Cu, $Q = 0.968e$ для W!!! Следовательно, существенную роль в разрушении микропроводников в условиях наших экспериментов, по крайней мере в течение $\Delta t = 1.57 \cdot 10^{-7}$ с, играет радиальная напряженность электрического поля электромагнитной волны (электродинамический, кулоновский взрыв?).

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН в рамках проектов фундаментальных исследований, выполняемых совместно учеными УрО, СО и ДВО РАН (проект No. 09-С-2-1002), и программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества» (проект No. 09-П-2-1016).