

УДК 533.9, 537.52

С.В. Барахвостов<sup>1</sup>, М.Б. Бочкарев<sup>1</sup>, Н.Б. Волков<sup>1</sup>, К.А. Нагаев<sup>1</sup>,  
В.П. Тараканов<sup>2</sup>, С.И. Ткаченко<sup>3</sup>, Е.А. Чингина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт электрофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ОИВТ РАН, Москва, 125412, Россия

<sup>3</sup> МФТИ, Долгопрудный, 141700, Россия

<sup>1</sup> e-mail: kanagayev@ier.uran.ru

## СВЕРХБЫСТРЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ МИКРОПРОВОДНИКОВ: СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА

В работе представлены результаты эксперимента по сверхбыстрому электрическому взрыву микропроводников при разряде высоковольтного источника напряжения с субнаносекундным фронтом импульса. Установлено: форма первой полуволны тока при одном и том же давлении в камере практически не зависит от материала и диаметра проводника; механизмы разрушения микропроводников зависят от давления; сложная пространственная структура плазменного канала и характер разлета продуктов взрыва свидетельствуют о его пространственной неоднородности. Все это свидетельствует в пользу того, что при сверхбыстром взрыве микропроводников физические процессы определяются электродинамическими процессами в поверхностном слое проводника и окружающем его пространстве.

**Ключевые слова:** взрыв микропроводников, разряд высоковольтного источника напряжения, структура плазменного канала.

### Введение

Явление электрического взрыва проводников (ЭВП) привлекает внимание ученых уже не одно столетие, например, одни из первых экспериментов по ЭВП описаны в работах [1-3]. В XX веке исследования получили широкое распространение [4] в связи с интересом к идее термоядерного синтеза, созданию источников рентгеновского излучения, а также получению мелкодисперсных порошков с заданными характеристиками [5].

Для ЭВП, как правило, используются источники энергии большой энергоемкости (порядка 10-100 кДж) и относительно небольших напряжений (порядка 10-20 кВ). Переход к источникам с более высокими амплитудами импульса напряжения (порядка сотен киловольт) и субнаносекундными фронтами представляют большой интерес для исследования сверх-

быстрой динамики электронов и нелинейных явлений на стадии ввода энергии, а также структуры образующегося в результате разряда плазменного канала и его оптических характеристик. При этом можно ограничиться существенно меньшим запасом энергии в источнике (например, на уровне 1-10 Дж).

В связи с этим целью данной работы являлось экспериментальное исследование структуры плазменного канала и характеристик его собственного оптического свечения при разряде источника высокого напряжения с субнаносекундным фронтом импульса и запасаемой энергией 1 Дж.

### Экспериментальная техника и аппаратура

В нашем эксперименте ГИН «РАДАН-220» [6] с волновым сопротивле-

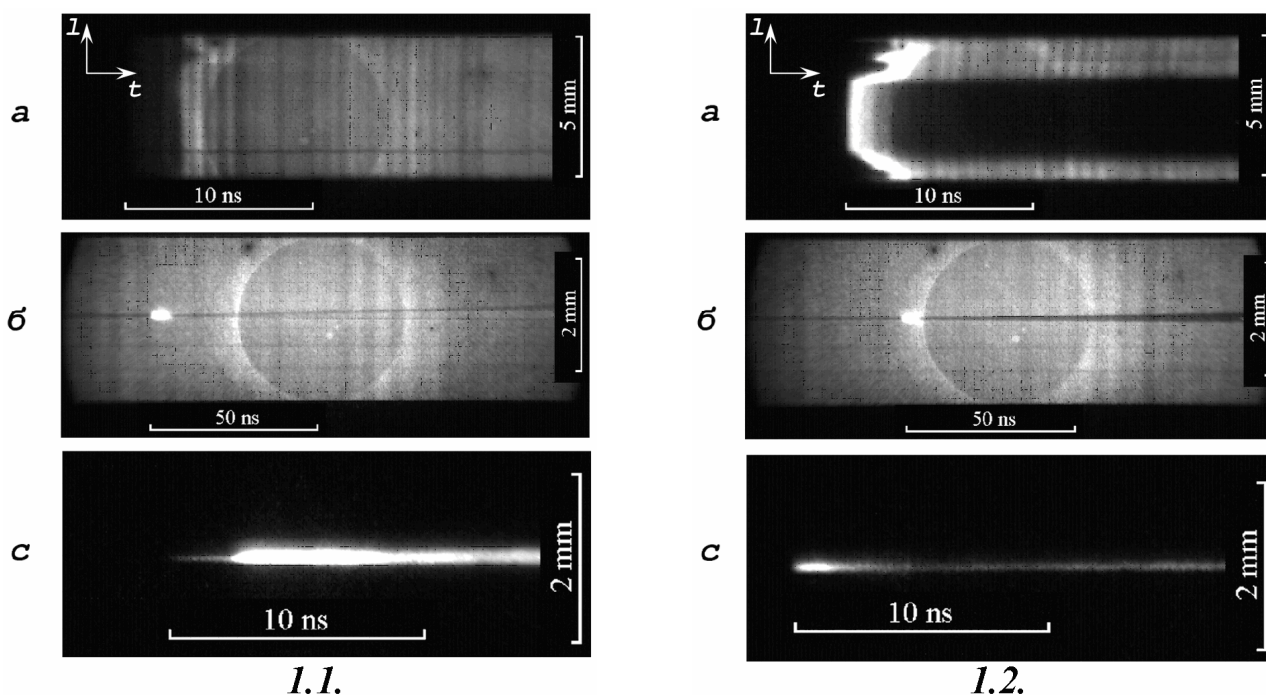


Рис. 1. Временные развертки свечения  $W$  микропроводника при положительной (1.1.) и отрицательной (1.2) полярности разряда: а) щель 0,5 мм ориентирована вдоль проволоочки; б) щель 0,5 мм ориентирована поперек проволоочки (теневая подсветка ИСШ 400); с) щель 0,5 мм ориентирована поперек проволоочки.

нием 50 Ом разряжался на коаксиальную линию (камеру) длиной 15 см и диаметром 10 см, в центральную жилу которой включались проволоочки из  $Cu$  диаметром 20 мкм,  $Ni$  – 25 мкм и  $W$  – 24.5 мкм и длиной 5 мм. Амплитуда импульса напряжения составляла 220 кВ; длительность фронта – 200-500 пс; энергия ГИН – 1 Дж. Давление в камере изменялось от  $10^{-4}$  до 760 Торр. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло, а электрический ток – с помощью шунта сопротивлением 0.4 Ом и четырехканального цифрового осциллографа Tektronix с полосой пропускания  $0.5 \div 1$  ГГц. Производились также фотосъемка канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon EOS 450D и Canon EOS 5D Mark II и системы колец для макросъемки (см. рис. 1); непрерывная развертка свечения канала с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173 и фотоэлемента (ФЭК) СПУ-22М; регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173.

## Результаты и обсуждение

В результате наших экспериментов установлено, что разрушение микропроводников зависит от величины давления газа в камере. Обнаружен диапазон давлений, в котором микропроводник не разрушается, либо разрушается в упругой стадии (для медной проволоочки эта область уже, чем для вольфрамовой). Изображения поверхности остатков взорванной при  $P = 2.17$  Торр медной проволоочки, полученные с помощью электронного микроскопа, показывают существование пространственной структуры эрозионных следов на поверхности практически не оплавленной в процессе разряда проволоочки.

Интегральные фотографии разряда демонстрируют неоднородность структуры канала, наличие вихревых и винтовых (гидродинамических и токовых) структур, ярко светящихся пятен и плазменных (электронных) струй. Замечено, что изменение полярности влияет на структуру свечения плазменной короны, а также на яркость этого свечения.

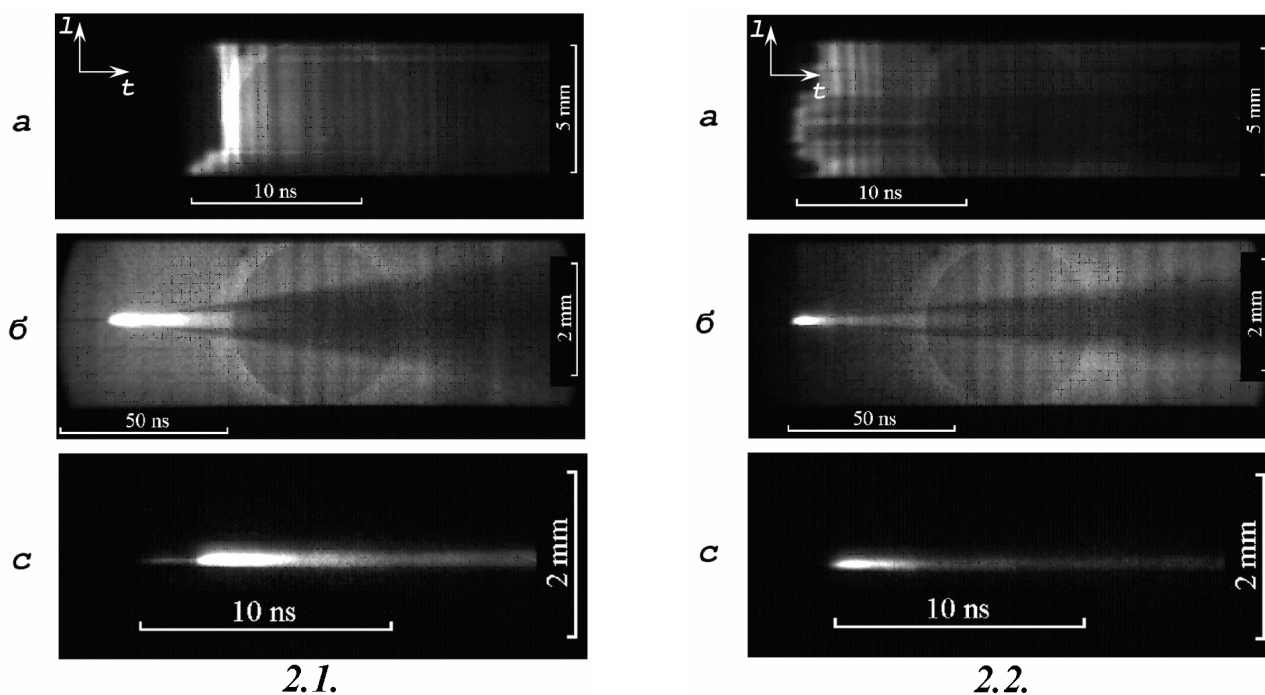


Рис. 2. Временные развертки свечения Cu микропроводника при положительной (2.1.) и отрицательной (2.2.) полярности разряда: а) щель 0,5 мм ориентирована вдоль проволоочки; б) щель 0,5 мм ориентирована поперек проволоочки (тенивая подсветка ИСШ 400); в) щель 0,5 мм ориентирована поперек проволоочки.

Сложный характер пространственной структуры плазменного канала, демонстрируемый интегральными снимками свечения канала, подтверждается структурой, напыленных на диэлектрическую подложку продуктов взрыва. По нашему мнению такой характер связан прежде всего с волновыми характеристиками используемого нами ГИН.

Кроме интегральной съемки взрыва микропроводников, мы также получали временные развертки свечения канала разряда при давлении  $P = 10^{-4}$  Торр с помощью стрик-камеры АГАТ «СФ-3М» (см. рис. 1, 2). Съемка проводилась как в собственном свете, так и с применением импульсной лампы подсветки ИСШ 400 для получения теневых снимков; щель располагалась как вдоль, так и поперек проволоочки. На рисунках 1 и 2 видно, что взрыв проводника зависит от полярности разряда: так, при положительной полярности проволоочка сначала разгорается на краях, и только потом – в центральной области, при этом структура канала разряда вдоль проводника более однородна, а скорость разлета продуктов взрыва

выше, чем в случае отрицательной полярности разряда.

Зарегистрированное с помощью ФЭК СПУ-22М излучение из плазменного канала (рис. 3) имеет три вспышки (особенно хорошо это видно для вольфрама). Первая – образование плазменной короны, вторая – разогрев плазменной короны током, третья – столкновение плазмы со стенками державки. Первая вспышка, длительностью 5 нс, коррелирует с провалом длительностью 5 нс на максимуме первой полуволны тока. Эта длительность и форма полуволны тока не зависят от материала микропроводников и полярности напряжения ГИН. Спектр излучения первой вспышки – непрерывный и связан с излучением плазменной короны в момент ее образования. Вторая – практически отсутствует у меди, слабо выражена у никеля и наиболее хорошо видна для вольфрама. Третья вспышка образуется позже в результате столкновения неидеальной плазмы расширяющегося ядра с фторопластовой стенкой оправки проволоочки.

Интересно сравнить развертки свечения плазменного канала медной,

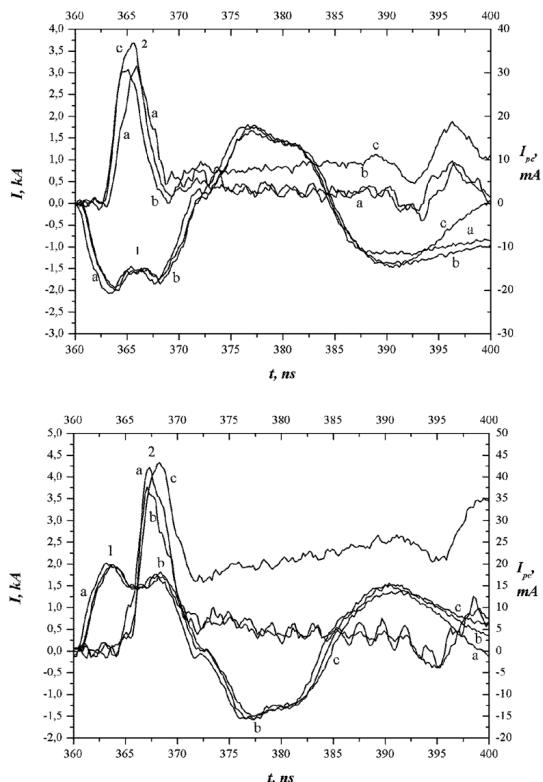
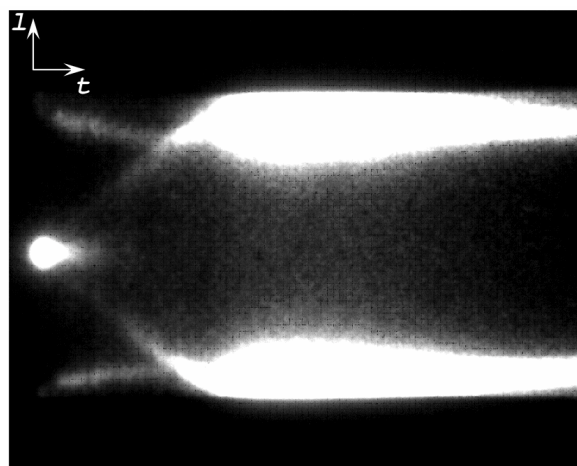
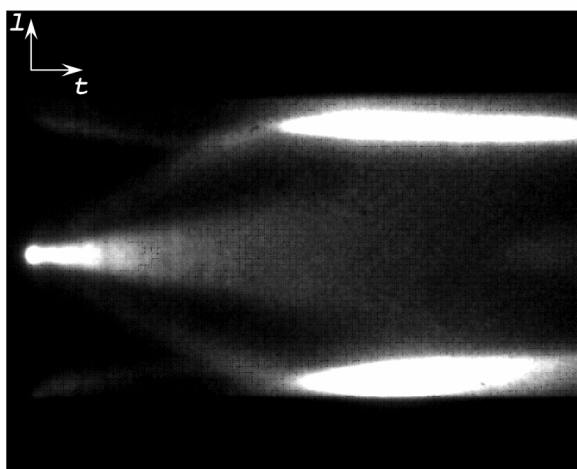


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока (1) и фототока с ФЭК-22СПУ-М (2): (a) – Cu, (b) – Ni, (c) – W проволочки; вверху – отрицательная, внизу – положительная полярность напряжения ГИН; 1 мА на кривых фототока соответствует  $I = 1.62 \text{ мВт/см}^2$  для  $\lambda = 530 \text{ нм}$  и  $I = 3.78 \text{ мВт/см}^2$  для  $\lambda = 265 \text{ нм}$ .

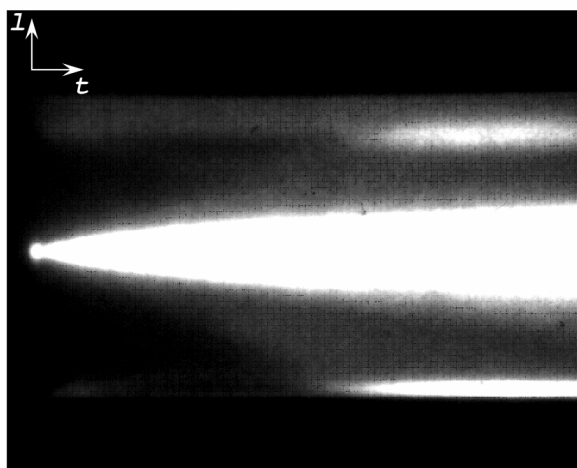
никелевой и вольфрамовых проволочек, полученные с помощью стрик-камеры Cordin-173 с разверткой 100 нс/мм. На рис. 4 показаны эти развертки при отрицательной полярности напряжения на проволочке, щель расположена поперек проволочки. Видно, что в действительности длительность свечения на оси плазменного канала существенно больше длительности первой вспышки. Интенсивное свечение у краев фторопластовой стенки державки проволочки возникает примерно через 500 нс (для меди), 800 нс (для никеля) и 1 мкс (для вольфрама) после первой вспышки в результате столкновения расширяющегося плазменного канала и струи эрозионной плазмы из стенки. Яркость свечения достаточна для получения теневой фотографии плотного ядра плазменного канала. У вольфрамовой плазмы яркость расширяющейся плазменной короны существенно выше яркости



Cu



Ni



W

Рис. 4. Временные развертки свечения канала разряда при отрицательной полярности напряжения источника, полученные с помощью стрик-камеры Cordin-173. Длина снимка составляет 2 мкс. Ширина снимка 20 мм.

свечения у стенок державки, поэтому для нее лучше использовать дополнительную подсветку. В силу малой скорости разлета вольфрамовой плазмы ( $(1-2) \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ), что существенно ниже скорости расширения,

например, меди ( $(4-6) \cdot 10^3$  м/с), ее вклад оказывается невелик, при этом он уменьшается с увеличением поперечных размеров оправки державки.

### Выводы

Интегральные спектры свечения показывают, что в спектре медной и вольфрамовой плазмы преобладают линии нейтралов и однократно заряженных ионов. При этом интенсивность свечения вольфрамовой плазмы в континууме существенно выше интенсивности в линиях. В спектре никелевой плазмы, кроме линий нейтралов и однократно заряженных ионов, присутствуют также линии двух- и трехкратных ионов, что определяется структурой электронных оболочек. Оценка температуры для меди

по отношению интенсивностей трех характерных спектральных линий дает температуру плазмы керны:  $T = 6000$  К.

Таким образом, все полученные нами результаты говорят в пользу того, что при сверхбыстром взрыве микропроводников физические процессы определяются не столько джоулевым нагревом, сколько электродинамическими процессами в поверхностном слое проводника и окружающем его пространстве.

*Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН (проекты No. 09-С-2-1002 и No. 09-П-2-1016), Совета по грантам при Президенте РФ (проект МД-4049.2010.2).*

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nairne E. // Phil Trans Roy Soc (London). Vol. 64. – pp. 79-89 (1774).
2. <http://www.kcl.ac.uk/depsta/iss/library/speccoll/bomarch/bomocst06.html>
3. [http://www.goldbulletin.org/assets/file/goldbulletin/downloads/Hackmann\\_3\\_7.pdf](http://www.goldbulletin.org/assets/file/goldbulletin/downloads/Hackmann_3_7.pdf)
4. Chase W.G. and Moore H.K. Exploding Wires. Eds. - N.Y.: Pergamon, 1959.
5. Kotov Y.A. // J. Nanoparticle Research. – 2003. – Vol. 5. – P. 539.
6. Mesyats G.A., Yalandin M.I. // Phys. Uspekhi. – 2005. – Vol. 48. – P. 211.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2011

S.V. Barahvostov<sup>1</sup>, M.B. Bochkarev<sup>1</sup>, N.B. Volkov<sup>1</sup>, K.A. Nagayev<sup>1</sup>, V.P. Tarakanov<sup>2</sup>, S.I. Tkachenko<sup>3</sup>, E.A. Chingina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, 620016, Russia

<sup>2</sup> JИТ RAS, Moscow, 125412, Russia

<sup>3</sup> MIPT, Dolgoprudny, 141700, Russia

<sup>1</sup> e-mail: [kanagayev@iep.uran.ru](mailto:kanagayev@iep.uran.ru)

## ULTRAFast ELECTRIC EXPLOSION OF MICROCONDUCTORS: PLASMA CHANNEL STRUCTURE AND OPTICAL CHARACTERISTICS

The paper presents the experimental results obtained upon ultrafast electric explosion of microconductors during the subnanosecond discharge of the high-voltage generator. It is revealed that: first current half-wave form at the same pressure is almost independent of the conductor material or diameter; microconductors mechanisms of destruction are pressure dependent; plasma channel complex structure and explosion products expansion features confirm its spatial inhomogeneity. All this bespeak for the physical processes to be determined by the electrodynamic ones taking place inside the wire surface layer and its vicinity during the ultrafast microconductors explosion.

**Key words:** microconductor explosion, subnanosecond discharge, plasma channel complex structure.

С.В. Барахвостов<sup>1</sup>, М.Б. Бочкарьов<sup>1</sup>, М.Б. Волков<sup>1</sup>, К.А. Нагаєв<sup>1</sup>,  
В.П. Тараканов<sup>2</sup>, С.І. Ткаченко<sup>3</sup>, Є.А. Чингіна<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрофізики УрО РАН, 620016, Єкатеринбург, Росія

<sup>2</sup> ОІВТ РАН, Москва, 125412, Росія

<sup>3</sup> МФТІ, Долгопрудний, 141700, Росія

<sup>1</sup> e-mail: kanagayev@ier.uran.ru

## НАДШВИДКИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИБУХ МІКРОПРОВІДНИКІВ: СТРУКТУРА ТА ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОВОГО КАНАЛУ

В роботі представлені результати експерименту по надшвидкому електричному вибуху мікропровідників при розряді високовольтного джерела напруги з субнаносекундним фронтом імпульсу. Встановлено: форма першої півхвилі струму при одному і тому ж тиску в камері практично не залежить від матеріалу і діаметру провідника; механізми руйнування мікропровідників залежать від тиску; складна просторова структура плазмового каналу і характер розльоту продуктів вибуху свідчать про його просторову неоднорідність. Все це свідчить на користь того, що при надшвидкому вибухові мікропровідників фізичні процеси визначаються електродинамічними процесами в поверхневому шарі провідника і оточуючому його просторі.

**Ключові слова:** вибух мікропровідників, розряд високовольтного джерела, структура плазмового каналу.