

Формирование протяженных направленных каналов пробоя в атмосфере, образованных взрывающейся медной проволокой

© В.В. Аполлонов, Н.В. Плетнев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: varpollo@kapella.gpi.ru, pletnev@kapella.gpi.ru

(Поступило в Редакцию 14 сентября 2012 г. В окончательной редакции 3 апреля 2013 г.)

Приведены результаты экспериментов по коммутации в режиме электрического пробоя промежутков в атмосфере длиной до 1.9 м произвольной геометрической формы, образованных взрывающейся проволокой из меди диаметром 90 μm , при начальной запасенной энергии 100–2100 Дж при напряжении менее 11 кВ. Возможны два режима формирования канала: режим взрыва проволоки без электрического пробоя и режим электрического пробоя в канале, образованном взрывающейся проволокой с задержкой (паузой тока), не превышающей 250 μs . В режиме электрического пробоя приводятся осциллограммы тока, напряжения на разрядном промежутке, значения удельного сопротивления. Обсуждены механизм и условия зарождения стримера при средней напряженности электрического поля в разрядном промежутке 5.3–17 кВ/м. Геометрические размеры отдельных плазменных образований формируемого канала, характер протекания электрического тока при пробое и механизм образования продуктов взрыва проволоки определяются из цветных макрофотографий. Обсужден механизм образования в режиме взрыва проволоки крупных аэрозолей в виде мельчайших частиц меди и оксида меди (CuO , Cu_2O) сферической формы.

Введение

В настоящее время проведен первый этап исследования управляемого электрического пробоя в плазменном канале, способном пропускать ток в режиме короткого замыкания в естественной или искусственной электрической цепи на траектории полета „Импульсара“ [1–3]. Канал длиной до ~ 1.9 м, содержит частицы аэрозолей меди и оксида меди (CuO , Cu_2O) [4–6], образованные электрическим взрывом проволоки (EW) из меди диаметром 90 μm в эмалевой оболочке.

Кроме лазерных методов создания канала высокой проводимости в атмосфере, в которых реализуется режим управляемого пробоя и получения канала высокой проводимости в атмосфере с помощью длинной лазерной искры [7] или лазерной подсветки УФ-импульсами КгF-лазера длительностью 100 нс [8], существуют и другие альтернативные способы. К одному из них — электрическому пробое, разделенному во времени паузой тока с EW, проявляется огромный интерес в большом количестве опубликованных работ [5,9–24]. В работе [25] при использовании трехкаскадного генератора Маркса и максимальной запасенной энергии 69.3 кДж при импульсе напряжения 270 кВ осуществлена коммутация промежутка длиной 60 м при использовании EW из меди в эмалевой оболочке диаметром 200 μm . Полученная напряженность среднего электрического поля при пробое составила $E_c \approx 4.5$ кВ/м. Аналогичный результат $E_c \approx 5.3$ кВ/м (уточненные значения) был получен в нашей работе при использовании EW из меди диаметром 90 μm в эмалевой оболочке [26]. При максимальной запасенной энергии ~ 270 Дж осуществлена управляемая коммутация промежутка длиной 1.6 м при зарядном напряжении $U_0 = 10.3$ –11 кВ. Следует отметить, что

первые результаты работы [26] были сообщены в [2]. Привлекает простота и низкая стоимость необходимого экспериментального оборудования, его осуществление в лаборатории требует только заряженного конденсатора или высоковольтного генератора импульсных токов, высокоточного коммутатора, средств соединения его с проволокой и самой проволоки [24–26].

Значительно ранее явление EW было использовано для возбуждения с некоторой вероятностью искусственных молний (триггерные молнии), путем запуска малых ракет с земли или с судна в океане [27–31]. Малогабаритная ракета с диэлектрическим или металлическим корпусом длиной около 1 м стартует с земли или с поверхности судна со скоростью 200 м/с, поднимая за собой тонкую заземленную стальную или медную проволоку диаметром 200 μm на высоту 200–300 м [27,28]. Катушка с проволокой находится на поверхности земли или на ракете. Команду на старт дают, когда электрическое поле у поверхности земли $E_c \approx 4$ –10 кВ/м [27]. Это гарантирует возбуждение молнии в 60–70% запусков. В случае удачного запуска на высоте 200–300 м от ракеты стартует первый компонент триггерной молнии (восходящий лидер), не имеющий главной стадии, который испаряет проволоку, создавая проводящий канал, пропускающий ток последующих компонентов молнии. После паузы тока [13,18] в еще не остывшем канале, образованном EW развивается стреловидный лидер молнии [30] (он всегда движется от облака к земле). Как было установлено в этой работе при исследовании триггерных молний, для развития стреловидного лидера обязательно требуется бестоковая пауза. Не имеющий ветвлений стреловидный лидер движется по каналу разряда предшествующего компонента молнии, развивая

скорость до $4 \cdot 10^7$ м/с. Последующие разряды молнии на финальном участке также происходят в основном по каналу, образованном следом EW. Следует отметить, что точка контакта с землей или с поверхностью судна при исследовании триггерных молний — это место крепления поднимаемой ракетой проволоки.

Существенным отличием техники эксперимента и результатов, полученных в наших работах [2,26] в сопоставлении с работами [24,25], является использование в качестве коммутатора серийного игнитронного разрядника IRT-3, который представляет собой вакуумированный металлический баллон с высоковольтным изолятором из стекла, в котором находится жидкая ртуть — катод, анод и поджигающий электрод. Применение ртути для катода позволяет получать большие плотности тока $\sim 10^6$ А/см² при небольших размерах самого коммутатора. Характерной особенностью ртутных коммутаторов является возможность однократной 100% перегрузки по амплитуде импульса тока, что определяет их высокую надежность в эксплуатации. Для IRT-3 напряжение на аноде не более 20 кВ (для IRT-6 — не более 25 кВ), ток в импульсе 100 кА (аварийный режим 200 кА). Как будет видно из дальнейшего рассмотрения, схема эксперимента значительно упрощается, так как газовые коммутаторы любого типа обладают большим количеством недостатков, главным из которых является высокое сопротивление в режиме коммутации и малый ресурс при их эксплуатации. На поддержание высокой проводимости коммутационной цепи тратится большое количество энергии от накопителя. По всем своим характеристикам газовые коммутаторы существенно уступают игнитронным разрядникам при рабочих напряжениях менее 25 кВ. В наших экспериментах проволока перед началом взрыва всегда находилась под высоким напряжением. При напряжении более 25 кВ для коммутации промежутка большой длины более 3 м использование игнитрона затруднено и следует переходить к экспериментальным методам, описанным в работах [24,25], где используются газовые коммутаторы. Преимуществом нашей схемы является наличие вольт-амперных характеристик пробоя, которые позволяют получить значение удельного электрического сопротивления в произвольный момент пробоя. Важным развитием является также предложенный в наших работах механизм стримерно-лидерного пробоя, который реализуется при пробое в сериях экспериментов, проведенных в работах [24–26].

1. Формирование управляемых электрических разрядов в канале, образованном тонкой взрывающейся медной проволокой

В настоящей работе в отличие от опубликованной ранее [26] приводятся уточненные экспериментальные результаты, подтверждающие механизм стримерно-

лидерного пробоя в канале, образованном EW из меди диаметром $90 \mu\text{m}$, длиной $L = 0.6–1.9$ м при зарядном напряжении $U_0 = 7–11$ кВ и емкости $C = 2–39.5 \mu\text{F}$. Описываются также некоторые физические явления, присущие явлению EW.

Существует ряд факторов, которые облегчают механизм пробоя (включая стримерную стадию) длинных промежутков в атмосфере в канале, образованном EW при средней напряженности электрического поля $E_c \approx 5.3$ кВ/м. Как было отмечено в работе [32], при анализе механизма образования в атмосфере искрового канала в разрядном промежутке с произвольной конфигурацией поля основным является вопрос о разогревании газа, обеспечивающем термическую его ионизацию в канале искры. В работе [33] отмечается, что процесс ионизации в сильноионизованной плазме существенно отличается от того, что происходит в плазме слабоионизованной, где молекулы ионизируются электронами, которые приобрели энергию непосредственно от электрического поля. В сильноионизованной плазме поле поставляет энергию всему электронному газу в целом. Электроны термализуются в результате столкновений друг с другом, приобретая максвелловское распределение. Ионизируют газ те из них, которые получили достаточно энергии, но не от поля, а в ходе обмена энергией с другими частицами. Поддерживать сильноионизованную равновесную плазму гораздо легче, чем слабоионизованную неравновесную — для этого требуется гораздо более слабое поле. Полю достаточно довести электрон лишь до энергии порядка $kT \approx 1$ eV [33].

В первых экспериментах [26] по созданию управляемого канала высокой проводимости в атмосфере был использован горизонтально ориентированный проводник из меди марки РЕV-2, содержащей эмалевую оболочку, длина и диаметр которой составляли: $L = 90–115$ см, диаметром $90 \mu\text{m}$ (диаметр $110 \mu\text{m}$ с учетом эмалевой оболочки). На рис. 1, а показаны схема экспериментальной установки и положение датчиков для измерения: тока — поясом Роговского, напряжения на конденсаторной батарее с помощью делителя напряжения и положение торца полированного кварцевого волокна, передающее излучение из канала разряда на быстродействующий рпн-фотодиод. Торцы волокна располагались на расстоянии $l = 1.5–5$ см от оси проволоки, в области катода или анода разрядного промежутка. Измерение формы импульса тока производилось с помощью дифференциального экранированного пояса Роговского с временным разрешением ~ 30 ns и постоянной интегрирования $\theta = \mathcal{L}_\Sigma / 2R \approx 380 \mu\text{s}$ [34], где \mathcal{L}_Σ , R — суммарная индуктивность и величина интегрирующего сопротивления в отдельном канале соответственно. Измерение формы напряжения на разрядном промежутке производилось с помощью экранированного делителя напряжения смешанного типа [35], подключенного к аноду батареи конденсаторов. Если не стремиться к длительному сохранению постоянства коэффициента деления и допустить некоторую неточность измерения

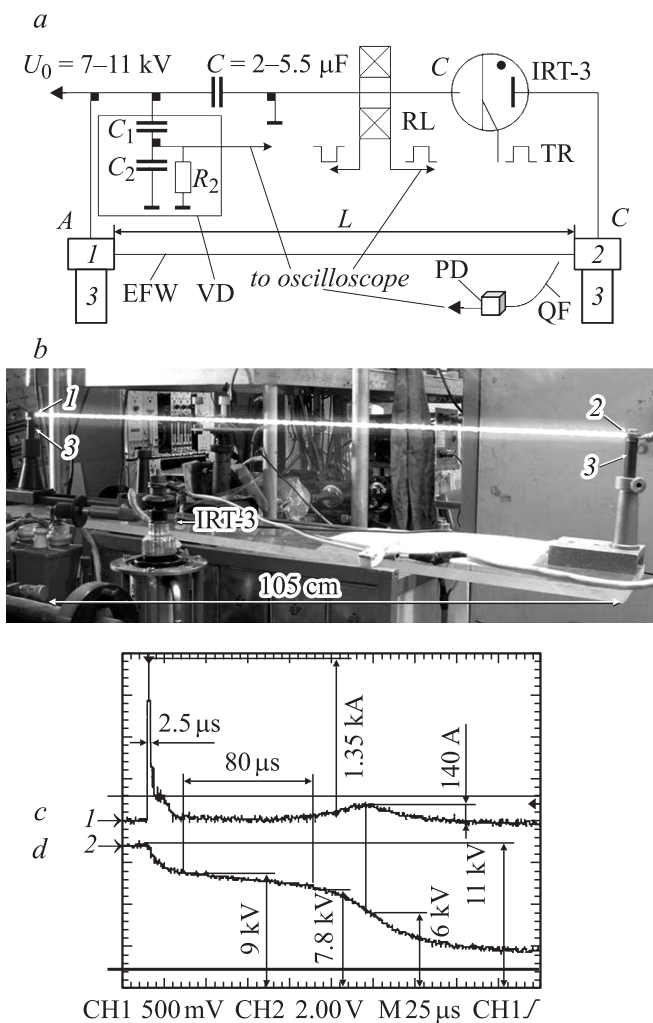


Рис. 1. Схема эксперимента по инициированию электрического пробоя в канале взорванной медной проволоки в горизонтальном положении (1, 2 — латунные электроды, 3 — эбонитовые изоляторы, IRT-3 — игнитрон-коммутатор, RL — пояс Роговского, VD — делитель напряжения, TR — пусковой импульс, EFW — взрывающаяся тонкая проволока, PD — фотодиод, QF — кварцевое волокно, А — анод, С — катод, "to oscilloscope" — на осциллограф) (а), фотография управляемого пробоя (b), осциллограммы тока (c) и напряжения (d).

напряжения в конце процесса разряда, то данный делитель напряжения дает ошибку измерения $\sim 1\%$ при длительности фронта тока $\tau_f \geq 1 \mu\text{s}$ [35]. Величина сопротивления R_2 , шунтирующего емкость C_2 , выбирается из условия допустимого искажения измеряемого напряжения по времени, когда это искажение не влияет на оценку процесса по осциллограмме. Роль отсутствующего на схеме сопротивления R_1 играет сопротивление утечки R_f изоляции емкости C_1 . При этом „плечи“ делителя имеют не одинаковые постоянные времени $R_f C_1 \neq R_2 C_2$. Достоинством данного делителя является то, что он не шунтирует слаботочный источник зарядных напряжений. В качестве регистрирующего прибора в работе использовался цифровой осциллограф Tektronix

TDS 220. Конденсатор емкостью $2 \mu\text{F}$ заряжался от высокопоточного источника зарядных напряжений в диапазоне $U_0 = 7-11 \text{ kV}$ [36]. При включении внешним пусковым импульсом управляемого разрядника-игнитрона IRT-3 конденсатор разряжался через проволоку из меди диаметром $90 \mu\text{m}$. Как показали эксперименты, наличие эмалевой оболочки помогает формировать в атмосфере тонкий прямой канал пробоя с диаметром проводящей зоны тока $d = 4-8 \text{ mm}$.

На рис. 1, b приведена фотография пробоя в канале, образованном EW из меди (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 105 cm) при $U_0 = 11 \text{ kV}$ и $C = 2 \mu\text{F}$. Она получена путем фотосъемки через синий фильтр FS-1 совместно с нейтральным фильтром NS-9 с помощью цифровой камеры OLYMPUS C-5050ZOOM. На фото снизу по отношению к проволоке показан лист белой бумаги, на который после пробоя падали частицы меди сферической формы с окисленной поверхностью, фотографии которых приводятся далее. При выдержке $1-1.6 \text{ s}$ фотоснимки носят интегральный характер, так как экспозиция при фотосъемке разряда определяется длительностью самого разряда. В процессе фотосъемки задавалось максимальное разрешение матрицы цифровой камеры при максимальном значении диафрагменного числа. При фотографировании всего разрядного канала расстояние от центра проволоки до объектива цифровой камеры $\sim 2 \text{ m}$. Для выявления деталей, размеров отдельных горячих частиц EW, диаметра канала и неоднородностей в структуре его свечения при пробое применялся режим макросъемки, при котором объектив цифровой камеры располагался на близком расстоянии $l = 25-50 \text{ cm}$ от нее. При этом использовался режим ZOOM цифровой камеры.

На рис. 1, c, d представлены осциллограммы тока и напряжения при наличии управляемого пробоя в канале EW. На осциллограмме напряжения после EW в период паузы тока [13,18] напряжение на батарее конденсаторов продолжает уменьшаться с 9 до 7.8 kV . Это связано с тем, что в период паузы ток, уменьшаясь на два порядка от максимального значения, сохраняет при этом конечное значение $\sim 10 \text{ A}$. К моменту пробоя величина напряжения на разрядном промежутке $\sim 7.8 \text{ kV}$ создает среднее электрическое поле в канале $E_c \approx 74 \text{ V/cm}$. Сам пробой происходит при падающей вольт-амперной характеристике, как в электрической дуге [33]. Импульс тока пробоя имеет колоколообразную форму с длительностью по полувысоте $\sim 30 \mu\text{s}$ и максимальным значением тока $\sim 140 \text{ A}$. По характеристикам тока и напряжения на разрядном канале можно определить количество энергии, затраченной на EW $\sim 36 \text{ J}$ и значение сопротивления канала в процессе пробоя в различные моменты времени. В частности, в момент максимума тока сопротивление канала минимально и равно $R_{\text{min}} \approx 43 \Omega$. В отличие от работ [20,23] данные о диаметре разрядного канала здесь не нужны, так как разряд медленный и индуктивной составляющей в падении напряжения на разрядном канале можно

пренебречь, в которых это падение напряжения учитывалось. Что касается нашего случая, то в соответствии с классификацией, данной У. Чейсом [9], EW с типичной скоростью ввода энергии $< 0.1 \text{ kJ/g ns}$ относится к медленному режиму, что соответствует нашему эксперименту. В этом случае индуктивное падение напряжения $\mathcal{L}\Delta I/\Delta t$ на подводящих проводах на этапе EW можно оценить, зная индуктивность прямого провода длиной $\sim 1 \text{ m}$ по формуле: $\mathcal{L} = 0.2 \ln(H/r) \mu\text{H/m}$ ([3], стр. 171), где H — длина проводника, а r — его радиус. При $H = 1 \text{ m}$ и $d = 2r = 5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ получим $\mathcal{L} \approx 1.2 \mu\text{H}$. $\Delta I/\Delta t = 1.35 \text{ kA}/2 \mu\text{s} = 6.8 \cdot 10^8 \text{ A/s}$ (рис. 1, *c*). $\mathcal{L}\Delta I/\Delta t \approx 800 \text{ V}$. Импульс перенапряжения, возникающий при EW, регистрируется в большом количестве работ, опубликованных в сборнике [9]. Он легко регистрировался в нашем эксперименте на любом полевом датчике типа петли или изолированного проводника на высокоомном входе цифрового осциллографа. Однако делитель напряжения в нашем эксперименте, подключенный к накопителю (конденсатору), данный импульс не регистрировал, так как емкость накопителя ($C = 2\text{--}39.5 \mu\text{F}$) для короткого импульса перенапряжения $\leq 1 \mu\text{s}$ (высокие частоты) представляет собой короткое замыкание. С другой стороны, из электротехники известно, что напряжение на емкости скачком измениться не может (точно так же, как ток в индуктивности). Поэтому на этапе EW падение напряжения на индуктивности подводящих проводов практически не влияет на вид вольт-амперной характеристики. Значение напряжения после EW при отсутствии в дальнейшем электрического пробоя измерялось высоковольтным электростатическим вольтметром как остаточное напряжение на накопителе после EW. Это значение сравнивалось со значением, полученным по осциллограмме напряжения. Следует отметить, что при достаточно низком напряжении на конденсаторной батарее $\sim 2.9 \text{ kV}$ (рис. 1, *d*) в процессе пробоя ток дуги обрывается. Величина этого остаточного напряжения на конденсаторной батарее, которое может быть измерено высоковольтным электростатическим вольтметром, определяется только параметрами разрядной цепи.

На рис. 1, *c* при наличии пробоя в канале, образованном EW при емкости $C = 2 \mu\text{F}$ и индуктивности $\mathcal{L} = 1.5 \mu\text{H}$ волновое сопротивление $\rho = \sqrt{\mathcal{L}/C} \approx 0.9 \Omega$. По вольт-амперным характеристикам разрядного промежутка $L \approx 105 \text{ cm}$ при пробое ($R_{\min} > 2\rho$), что соответствует аperiодической форме разряда.

На последующем этапе пробоя после паузы тока можно также оценить влияние индуктивного падения напряжения $\mathcal{L}\Delta I/\Delta t$ на подводящих проводах на вид вольт-амперной характеристики. Зная индуктивность прямого провода длиной $\sim 1 \text{ m}$, $\mathcal{L} \approx 1.2 \mu\text{H}$. Скорость нарастания тока на этапе пробоя $\Delta I/\Delta t = 140 \text{ A}/40 \mu\text{s} = 3.5 \cdot 10^6 \text{ A/s}$ (рис. 1, *c*). Индуктивное падение напряжения на подводящих проводах не превышало $\mathcal{L}\Delta I/\Delta t \approx 4 \text{ V}$. Наибольшая скорость нарастания тока на этапе пробоя в

настоящей работе не превышала $3.5 \cdot 10^8 \text{ A/s}$ и соответственно индуктивное падение напряжения на подводящих проводах не превышало $\mathcal{L}\Delta I/\Delta t \approx 420 \text{ V}$. На этапе пробоя, длительность которого на порядок превышает длительность процесса EW, индуктивное падение напряжения на подводящих проводах влияет на вид вольт-амперной характеристики. Однако делитель напряжения подключался, как правило, к накопителю (емкости), для того чтобы фиксировать начало пробоя и соответствующий баланс энергии на этапе EW и последующем далее пробое. Ошибка, совершаемая при этом, в расчетах по вольт-амперной характеристике при подключении делителя напряжения на конденсаторе не превышала 5%. В некоторых случаях для проверки делитель напряжения подключался непосредственно к аноду разрядного промежутка. Для определения влияния паразитной индуктивности разрядного контура на вольт-амперную характеристику мы специально в цепь разряда после конденсатора (накопителя) вводили большую индуктивность $\sim 50 \mu\text{H}$. В ходе проведенных экспериментов было обнаружено малое ее влияние на значение удельного пробивного напряжения и вид вольт-амперной характеристики разрядной цепи.

Под управляемым пробоем мы имели в виду два свойства управляемой коммутации: а) жесткая привязка по времени (синхронизация) начала пробоя по отношению к управляющему импульсу тока, включающего разрядник-игнитрон IRT-3 (рис. 1, *a*). При постоянном зарядном напряжении на накопителе разброс в отклонении начала пробоя от начала импульса запуска игнитрона не превышал нескольких микросекунд. Начало пробоя определялось нами по уровню 0.05 от максимального значения сигнала свечения при пробое разрядного промежутка, поступающего с быстродействующего pin-фотодиода. Схема запуска игнитрона IRT-3 опубликована в работе [34]; б) вторым свойством управляемой коммутации по нашему мнению является возможность управления траекторией пробоя, которая наглядно продемонстрирована далее на рис. 4 и которая определяется пространственным положением ВП.

При емкости накопителя $C = 2 \mu\text{F}$ в зависимости от зарядного напряжения и длины проволоки возможен режим EW без пробоя. Схема экспериментальной установки осталась прежней. На рис. 2, *a, b* приведены фотографии канала, образованного взрывом медной проволоки (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 110 и 115 cm) в отсутствие пробоя при напряжении 10 kV и емкости $2 \mu\text{F}$. На фотографии видно, что структура канала носит прерывистый характер. Она состоит из отдельных изолированных плазменных образований перегретых капель жидкости материала проволоки [11], что далее будет подтверждено фотографиями в режиме макросъемки.

На рис. 2, *c, d* представлены осциллограммы тока и напряжения при EW в отсутствие пробоя. Напряжение на конденсаторной батарее к моменту окончания EW уменьшается до $\sim 8 \text{ kV}$. Максимальное значение импульса тока при EW определяется, главным образом,

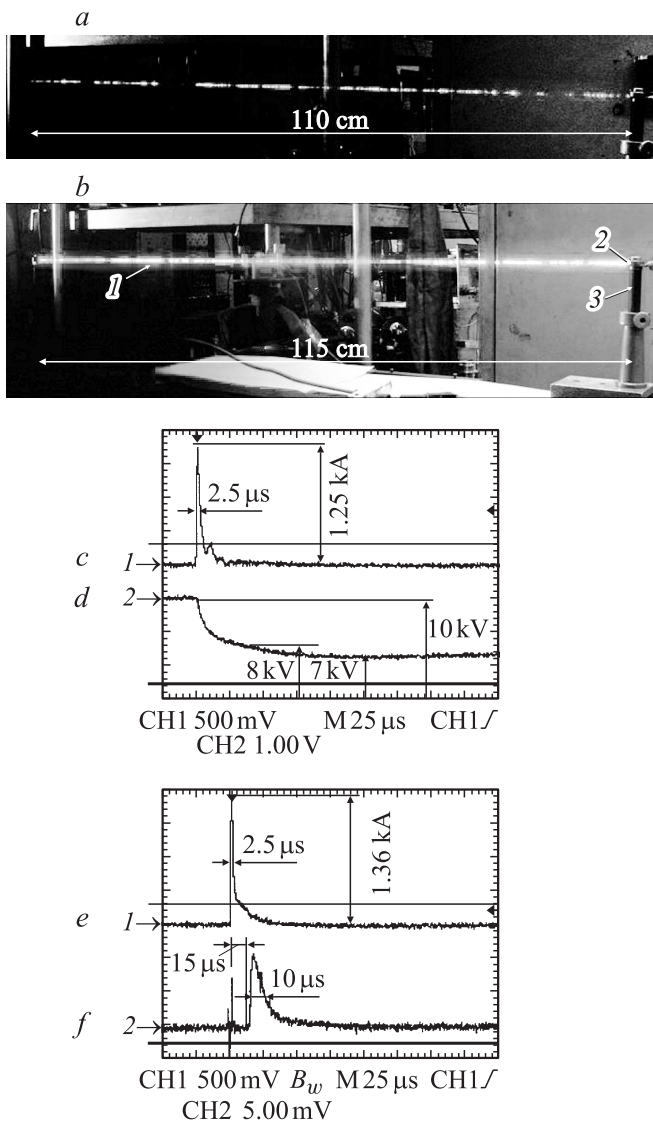


Рис. 2. Фотографии взрывающейся проволоки в отсутствие пробоя (*a, b*); осциллограммы тока (*c*) и напряжения (*d*), осциллограммы тока (*e*) и свечения (*f*). 1 — взрывающаяся проволока, 2 — латунный электрод, 3 — эбонитовый изолятор.

при постоянном зарядном напряжении U_0 начальным сопротивлением проволоки R_0 и составляет 1.25 кА. При изменении длины медной проволоки диаметром $90 \mu\text{m}$ в пределах 90–160 см измеренные сопротивления составили 2.7–4.3 Ω . При $U_0 = 11 \text{ kV}$ и $C = 2\text{--}5.5 \mu\text{F}$ максимальная амплитуда импульса тока изменялась в диапазоне 1–1.4 кА. На рис. 2, *c* после взрыва по горячему каналу некоторое время протекает ток $\sim 10 \text{ A}$, затухающий до нуля. В результате этого остаточное напряжение на конденсаторной батарее уменьшается до значения $\sim 7 \text{ kV}$. Несмотря на протекание остаточного тока, после взрыва, который увеличивает температуру канала, при данных параметрах разрядной цепи пробой не возникает. Следует отметить, что на стадии затухания разрядного тока видна модуляция, соответствующая

развитию неустойчивости в процессе EW. Количество энергии, затраченной на EW, рассчитанное по осциллограммам тока и напряжения в данном опыте $\sim 43 \text{ J}$. На рис. 2, *e, f* представлены осциллограммы тока и свечения при отсутствии пробоя в канале EW, представленном на рис. 2, *a*. Максимальное значение импульса тока $\sim 1.36 \text{ kA}$. Свечение канала, образованного EW регистрировалось быстродействующим pin-фотодиодом с временным разрешением $\sim 1 \text{ ns}$. Световое излучение на светочувствительную площадку фотодиода подавалось через кварцевое волокно длиной $\sim 2 \text{ m}$. При этом полированный приемный конец волокна находился в области анода разрядного промежутка на расстоянии $l = 1.5\text{--}4 \text{ cm}$ от разрядного канала. Недостатком такой системы регистрации является ее низкая чувствительность, однако при регистрации излучения от источников света с большой яркостью амплитуда сигнала была достаточной для надежной осциллографической регистрации на цифровом осциллографе Tektronix TDS 220. Данная система регистрации позволяла также фиксировать более слабое излучение EW при отсутствии пробоя в канале. Для этого торец волокна приближался к разрядному каналу на расстояние $\sim 1.5 \text{ cm}$. Спектральная чувствительность канала регистрации определяется спектральной чувствительностью фотодиода и коэффициентом пропускания волокна. Длительность регистрируемого импульса излучения на рис. 2, *f* по полувысоте $\sim 10 \mu\text{s}$, время задержки $\sim 15 \mu\text{s}$ от начала EW. В первые $15 \mu\text{s}$ после EW излучение в видимой области малб (регистрируется излучение с длиной волны в диапазоне $2.5\text{--}0.5 \mu\text{m}$) [14].

В серии экспериментов при горизонтальном положении для $C = 2 \mu\text{F}$ изменялись только длина проволоки в диапазоне 90–115 см и зарядное напряжение в пределах 7–11 кВ. Экспериментально установлено, что при $L \approx 100 \text{ cm}$ минимальное зарядное напряжение, при котором пробой промежутка отсутствует $\sim 8 \text{ kV}$, что соответствует минимальной запасенной энергии $\sim 64 \text{ J}$.

В последующей серии экспериментов был рассмотрен вариант вертикального положения проволоки при исследовании режима пробоя в канале EW. Данный вариант более предпочтителен, так как учитывает возможное влияние вертикальной компоненты электрического поля у поверхности Земли на пробой.

На рис. 3 показаны два случая использования EW приблизительно одинаковой длины 108 и 105 см, для которых режим пробоя исследовался при двух различных значениях емкостей 2 и $4.5 \mu\text{F}$ при $U_0 = 11 \text{ kV}$. На рис. 3, *a* приведена фотография управляемого пробоя в канале, образованном EW (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 108 см) при емкости накопителя $C = 2 \mu\text{F}$ и начальной запасенной энергии $\sim 120 \text{ J}$. Случаю рис. 3, *a* соответствуют осциллограммы напряжения на рис. 3, *b* и тока на рис. 3, *c*. На рис. 3, *f* приведена фотография управляемого пробоя в канале, образованном EW (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 105 см) при емкости накопителя $C = 4.5 \mu\text{F}$ и начальной запасенной энергии $\sim 270 \text{ J}$.

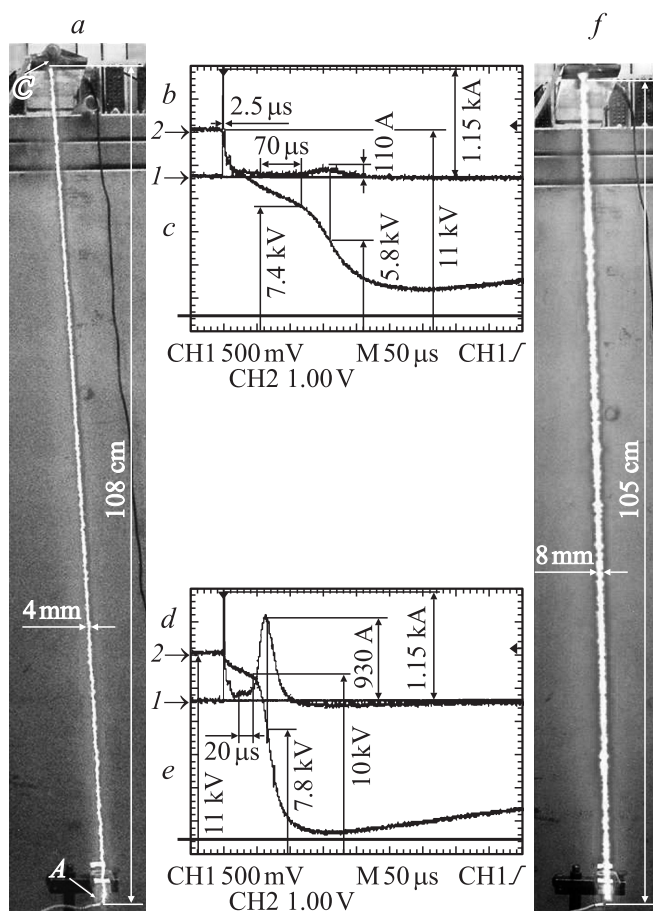


Рис. 3. Фотография управляемого пробоя при вертикальном положении в канале взрывающейся проволоки длиной 108 см (а), осциллограммы напряжения (b) и тока (c), фотография управляемого пробоя длиной 105 см (f), осциллограммы напряжения (d) и тока (e). А — анод, С — катод.

Случаю рис. 3, f соответствуют осциллограммы напряжения на рис. 3, d и тока на рис. 3, e. Так как на EW в обоих случаях тратится приблизительно одинаковое количество энергии ~ 36 Дж, то во втором случае в пробой вкладывается большая энергия ~ 170 Дж и он сопровождается большим диаметром разрядного канала. Это видно также и по осциллограммам напряжения на рис. 3, d и тока на рис. 3, e. Для осциллограммы тока при более короткой паузе ~ 20 μ s максимальная амплитуда тока при пробое увеличилась до значения ~ 930 А при длительности импульса тока по полувысоте ~ 30 μ s. В работе [3] было отмечено, что физически влияние на сопротивление канала оказывает не ток, а количество выделившейся энергии W в единице длины канала. В этом случае из-за малого сопротивления канала в процессе пробоя обрыв тока дуги происходил при меньшем напряжении на конденсаторной батарее ~ 2 кV. Для осциллограммы тока на рис. 3, c длительность паузы возрастает до ~ 70 μ s, максимальная амплитуда тока при пробое резко падает до значения ~ 110 А. В этом случае из-за большого сопротивления канала

в процессе пробоя обрыв тока дуги происходил при большем напряжении ~ 3 кV. По осциллограммам тока и напряжения в первом и втором случаях в момент максимума тока минимальное сопротивление канала равно ~ 52 Ω и ~ 8 Ω соответственно. При этом во втором случае в процессе пробоя обеспечиваются более высокая максимальная температура канала и меньшее удельное сопротивление ~ 7.6 Ω /m.

Чтобы определить, при какой максимальной длине проволоки в эксперименте реализуется режим пробоя в канале, образованном EW, можно менять величину зарядного напряжения и емкости конденсаторной батареи в сторону увеличения. Как было показано в работе [25], существенного увеличения длины ~ 60 м в канале, образованном EW, можно достигнуть, увеличив величину импульса напряжения до 270 кV. В нашем случае при величине $U_0 = 11$ кV мы пошли по пути увеличения емкости от 2 μ F до максимального значения в нашем эксперименте 39.5 μ F при максимальной запасенной энергии ~ 2.4 кJ. В этом случае максимальная длина проволоки, при которой реализуется режим пробоя, будет увеличиваться. Это связано с тем, что с увеличением емкости после EW остаточное напряжение перед моментом пробоя будет расти так, как показано на рис. 3 с 7.4 до 10 кV, и это приводит к увеличению длины пробоя в канале. К настоящему времени для 39.5 μ F и зарядного напряжения 10.3 кV при начальной запасенной энергии ~ 2.1 кJ максимальная длина коммутируемого в режиме управляемого пробоя промежутка в атмосфере составила ~ 1.9 м, что соответствовало минимальному удельному напряжению пробоя $E_c \approx 5.3$ кV/m. Минимальное удельное сопротивление канала в процессе пробоя ~ 2.3 Ω /m. Данные экспериментальные результаты будут опубликованы в отдельной работе.

Анализ большого количества фотографий, на которых изображен пробой промежутка, образованного EW, свидетельствует об исключительной управляемости траектории пробоя. Пробой происходит по траектории, задаваемой натянутой медной проволокой, и не имеет ветвлений. Для подтверждения данного положения на рис. 4 приведены фотографии возможных траекторий пробоя, задаваемых проволокой. На фотографии на рис. 4, a проволока натянута вдоль прямой линии с изломом, пробой следовал по траектории, задаваемой проволокой. Если на натянутой проволоке сформировать часть окружности с разрывом, величина которого более 1 см, то пробой следовал по траектории, включающей окружность так, как показано на рис. 4, b. При уменьшении величины разрыва до ~ 1 см в некоторых случаях пробой шел по кратчайшему пути — закортке, как на рис. 4, c.

Каким же требованиям должно удовлетворять ионизованное образование, чтобы оно могло положить начало пробую? В работе [33] приводятся минимальные требования к ионизованному образованию, чтобы оно могло положить начало стримеру. Рассмотрим однородное плазменное образование радиусом R_s , помещенное в однородное поле E_0 . Для возникновения самораспростра-

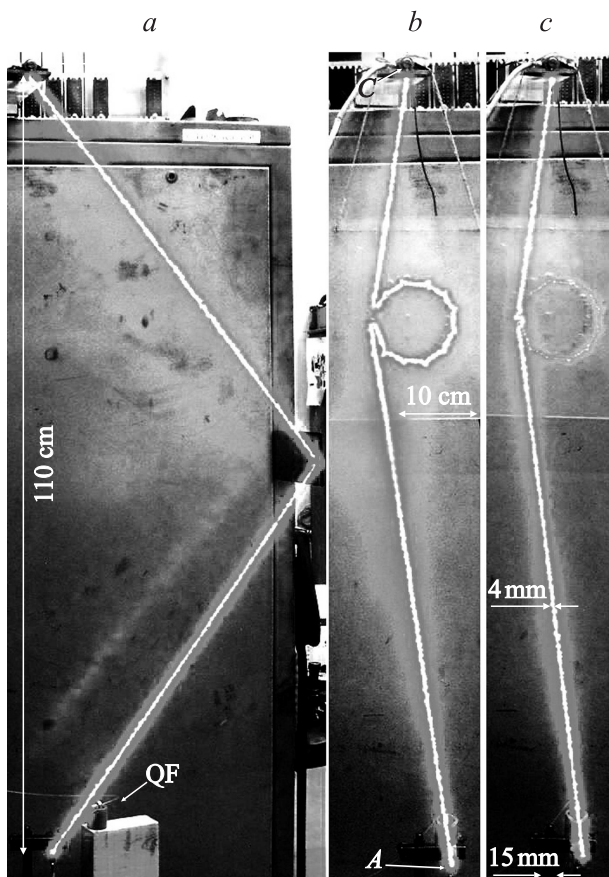


Рис. 4. Фотографии управляемого пробоя при зарядном напряжении 11 kV и емкости 3.8 μF . По ломаной линии (длина траектории пробоя ~ 150 см) (a), с элементом окружности и зазором (длина траектории пробоя ~ 142 см) (b), с элементом окружности при траектории пробоя по кратчайшему, спрямленному пути (длина траектории пробоя ~ 112 см) (c). A — анод, C — катод, QF — кварцевое волокно.

няющегося плазменного канала необходимо, чтобы внутри плазменного образования внешнее поле было вытеснено, а снаружи — усилено. Для того чтобы внешнее поле было вытеснено из всего объема сферы, заряды должны быть распределены по поверхности неравномерно. Значит, чтобы из начального плазменного образования могло быть вытеснено внешнее поле, в нем должно содержаться не менее $N_e = 3\varepsilon_0\pi R_s^2 E_0 / e$ электронов. Если учесть, что радиус образования должен быть не меньше, чем $1/\alpha$ (α — эффективный коэффициент ионизации), то мы приходим к следующей оценке нижнего предела для количества электронов, из которого может возникнуть стример [33]: $N_{\text{emin}} = 3\varepsilon_0\pi E_0 / (e\alpha^2)$. В качестве примера рассмотрим воздух атмосферного давления. При напряженности поля пробоя $E_0 = 31.4$ kV/cm и эффективном коэффициенте ионизации $\alpha = 12.4$ cm $^{-1}$ получим $N_{\text{emin}} \approx 2 \cdot 10^9$. Ограничение на плотность плазмы тем жестче, чем меньше радиус плазменного образования. Для минимально допустимого $R_s \approx 1/\alpha$ концентрация электронов n_{emin} в воздухе атмосферного давления

должна составлять $\sim 4 \cdot 10^{11}$ cm $^{-3}$. Также необходимо, чтобы размер плазменного образования R_s был не меньше длины ионизации в поле, равном или несколько превышающем внешнее поле. В воздухе атмосферного давления длина ионизации $1/\alpha \approx 0.8$ mm.

Если начальный размер плазменного образования, находящийся в однородном поле, удовлетворяет сформулированным требованиям, от него вдоль поля в обе стороны побегут волны ионизации, оставляя за собой плазменный канал.

Рассмотрим в нашем эксперименте структуру канала и динамику образования плазменных очагов в канале EW в отсутствие пробоя. Как было отмечено в работах [14,15], в процессе EW на плавление и частичное испарение определенной массы медной проволоки затрачивается количество энергии (пороговая энергия), меньшее как минимум в 2 раза энергии сублимации E_s , необходимой для ее полного испарения. Для медной проволоки (диаметр 90 μm , длина 100 см) энергия сублимации $E_s \approx 330$ J. Как показано в работе [15], в режиме EW при переходе проволоки в жидкую фазу силы сопротивления резко падают, и оказывается возможным развитие перетяжечной неустойчивости. Перетяжечная неустойчивость развивается и рвет проводник за время ~ 1 μs . После того как неустойчивость возникла, выделение джоулева тепла сосредоточивается в перетяжках, и в этих местах может происходить испарение металла. Испарение происходит локально в течение малого промежутка времени. До разрушения проводника успевает испариться лишь незначительная часть вещества. Следовательно, пороговая энергия должна быть меньше энергии сублимации, что и наблюдается на опыте. По нашим данным для EW из меди (диаметр 90 μm , длина 100, 140 см), в эмалевой оболочке достаточно энергии ~ 35 и ~ 50 J соответственно, что составляет $\sim 10\%$ от энергии сублимации. Эксперименты показали, что данная величина энергии при фиксированных параметрах проволоки (диаметр и ее длина) и фиксированном зарядном напряжении U_0 почти не меняется и формируется автоматически вне зависимости от емкости накопителя (в диапазоне, достаточном для осуществления режима EW). Причиной этого является возникновение паузы тока [13,18], во время которой значение разрядного тока уменьшается более чем в 100 раз. Существует много теорий, объясняющих данное явление. В работе [11] нарушение металлической проводимости обусловлено действием высокого давления и возникающей при этом неустойчивости, которая приводит к возникновению множества коротких перегретых участков, из которых вещество проволоки оказывается выброшенным за пределы участка. По другой теории пауза тока возникает как результат метастабильного перегретого состояния паров проволоки в процессе EW [37]. В работе [16] при исследовании EW из меди рентгеновским методом получено, что наименьшая плотность жидкой меди, при которой она находится в виде сплошного цилиндра 4.1 g/cm 3 . При этом плотность составляет 0.47 от плотности меди

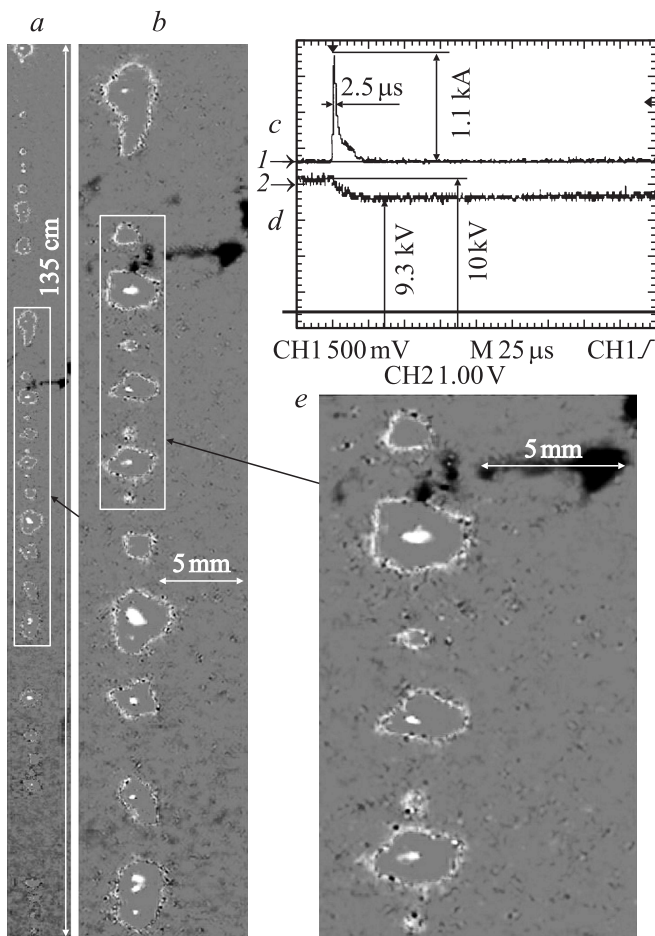


Рис. 5. Фотография фрагмента канала, образованного взрывающейся проволокой в режиме макросъемки при отсутствии пробоя (а), (b), (e); осциллограммы тока (с) и напряжения (d).

в твердом состоянии. По результатам стационарных измерений для жидкой ртути [38] при плотности ниже $8.5\text{--}9\text{ г/см}^3$ изменяется характер электрической проводимости ртути: проводимость перестает быть чисто металлической. Эта плотность составляет $0.62\text{--}0.66$ от плотности ртути в твердом состоянии. Таким образом, на основе экспериментальных данных в работе [21] делается вывод что, металлическая проводимость разных металлов резко падает при плотности $\gamma/\gamma_0 = 0.45\text{--}0.66$, где γ_0 — исходная плотность металла в твердом состоянии. Известно из технологии [39], что при переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение (скачком) удельного сопротивления. Для меди при температуре плавления 1083°C удельное сопротивление скачком увеличивается в 2.4 раза. Уместно также отметить и предсказание, сделанное Я. Зельдовичем и Л. Ландау в работе [40] относительно перехода металлов из металлического в неметаллическое состояние в подобных условиях.

В процессе проведенной нами макросъемки с высоким пространственным разрешением получено большое количество фотографий, на которых хорошо видна струк-

тура канала в атмосфере в процессе EW. На рис. 5, а, b, e приведены фотографии фрагмента канала, образованного EW из меди (диаметр $90\text{ }\mu\text{м}$, длина 140 см) при $U_0 = 10\text{ кВ}$ и $C = 4.5\text{ }\mu\text{Ф}$ в режиме макросъемки при отсутствии пробоя в канале. На фотографии видны светящиеся плазменные образования, образованные парами расплавленной меди, некоторые из них имеют почти правильную сферическую форму. Диаметр отдельных образований от долей миллиметра до $\sim 4\text{ мм}$. В центре светящихся плазменных образований видны горячие точки с высокой температурой, в которых пары металла находятся в метастабильном состоянии, с точки зрения газа — это перегретая жидкость, а с обратной стороны — перенасыщенный пар [37]. Температура данных областей находится в диапазоне $3000\text{--}5000^\circ\text{C}$. Кроме того, в канале после взрыва присутствуют мельчайшие частицы, включая наночастицы (не видимые на фотографии), аэрозоль меди и оксида меди (CuO , Cu_2O), как правило, сферической формы с диаметром от 50 нм до $20\text{ }\mu\text{м}$ [6]. Осциллограммы тока на рис. 5, с и напряжения на рис. 5, d на разрядном промежутке для данного эксперимента типичны при различных параметрах разрядной цепи. Количество энергии, затраченной на EW, рассчитанное по осциллограммам тока и напряжения, в данном опыте $\sim 31\text{ Дж}$.

На рис. 6, а, b приведены фотографии частиц сферической формы, обнаруженных на белом листе бумаги, показанном на рис. 2, b после взрыва горизонтально расположенной проволоки. Фотография сделана в режиме макросъемки на расстоянии 3 см от снимаемого объекта при максимальном разрешении матрицы цифровой камеры. Размеры диаметров шариков, различимых на фотоснимке, колеблются в диапазоне $20\text{--}300\text{ }\mu\text{м}$. Более мелкие частицы сферической формы с диаметрами менее $20\text{ }\mu\text{м}$ не различимы на фотоснимке. Фотография на рис. 6, с наночастиц диаметром $50\text{--}70\text{ нм}$ после EW была взята с Интернет-сайта: <http://www.nanosized-powders.com> (компания ART-металлические нанопорошки) [6]. Специальных исследований в этой области мы не проводили. Сферическая форма частиц объяснима преобладающим действием сил поверхностного натяжения на частицы расплавленной меди при их формировании. Большой разброс диаметров частиц объясняется процессом дробления и объединения расплавленных капель в процессе EW [41]. Следует отметить также черный цвет шариков, не свойственный цвету меди. Цвет шариков обусловлен образованием оксида меди на их поверхности в результате взаимодействия меди с кислородом воздуха. Процесс окисления является обратимым, так как при нагреве оксида меди до $T \approx 1200\text{ К}$ он восстанавливается и снова превращается в медь [6]. Из-за процессов окисления частиц из меди концентрация кислорода в канале должна резко уменьшаться. В работе [42] приведен график зависимости среднего электрического поля в канале катодонаправленного стримера в зависимости от содержания кислорода O_2 в аргоне Ar. При уменьшении концентрации кислорода в канале до нуля величина среднего электрического поля

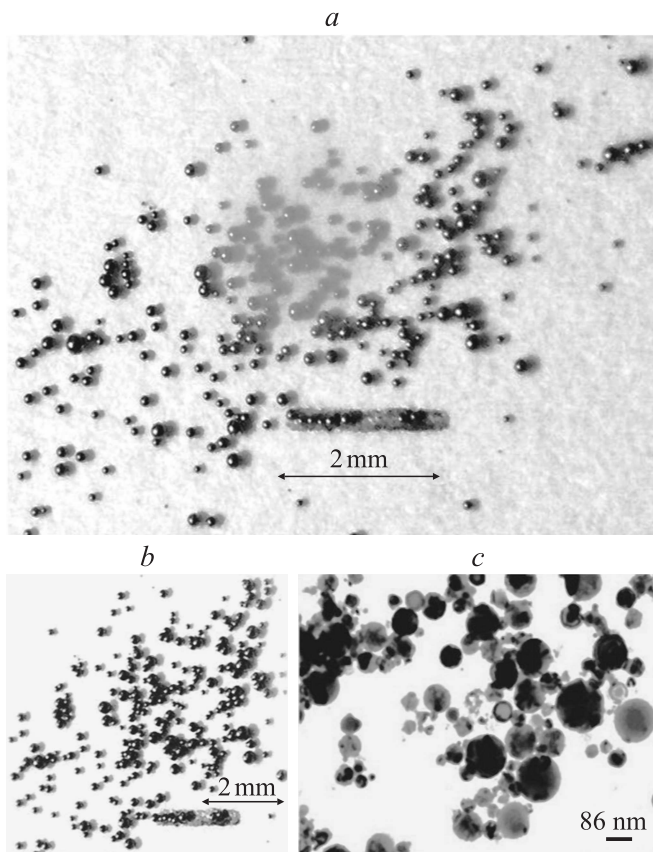


Рис. 6. Продукты взрыва медной проволоки (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 110cm) при $U_0 = 10 \text{kV}$ и $C = 2 \mu\text{F}$: шарики меди с окисленной сферической поверхностью диаметром $20\text{--}300 \mu\text{m}$ (a), (b); шарики оксида меди (CuO , Cu_2O) диаметром $50\text{--}80 \text{nm}$ (фото с сайта <http://www.nanosized-powders.com>) (c).

уменьшается до значения $E_c \approx 400 \text{V/cm}$. Физически это можно объяснить ликвидацией одного из каналов гибели электронов. Ибо в отсутствие электроотрицательных молекул нет прилипания электронов, и проводимость канала не столь сильно уменьшается за время пролета стримера по каналу [33]. В работе [43] приводится график зависимости среднего электрического поля в канале катодонаправленного стримера, перекрывшего разрядный промежуток 0.5m , в зависимости от относительной плотности воздуха, меняющейся за счет нагрева при давлении 760Torr и в результате снижения давления при 300K . При нагреве газа до температуры 900K при нормальном атмосферном давлении значение среднего электрического поля в канале уменьшается до значения $E_c \approx 600 \text{V/cm}$.

Ввиду важности влияния крупных аэрозолей диаметром $20\text{--}330 \mu\text{m}$ на пробой в канале в качестве центров плазменных образований после EW обсудим механизм их образования. В ходе экспериментов после EW были обнаружены длинные менее 10cm фрагменты эмалированной оболочки, фотография одного из которых приведена на рис. 7, a. Наличие таких фрагментов в неизменном

виде казалась маловероятным, так как оболочка легко сгорает в пламени спички и не выдерживает высокой температуры. Кроме того, резкое расширение канала при взрыве должно приводить к ее быстрому механическому разрушению. Объяснить данный экспериментальный факт помогают рис. 7, b и рис. 7, c. На рис. 7, b приведено увеличенное изображение фрагмента эмалированной оболочки после взрыва; в виде черных точек — сквозных отверстий в оболочке — показаны места, через которые расплавленные капли металла проволоки покидали оболочку. Расстояние между двумя соседними прожогами $3\text{--}5 \text{mm}$. Так как это очень быстрый про-

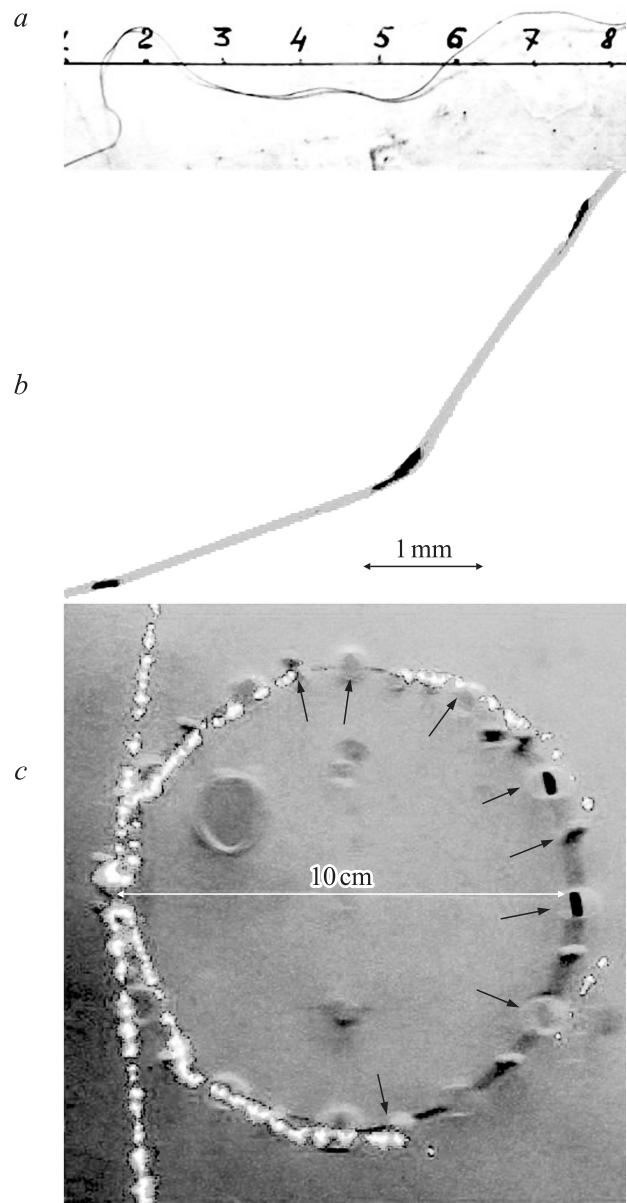


Рис. 7. Механизм образования частиц меди при взрыве проволоки. Фотография фрагмента эмалированной оболочки после взрыва (a), в режиме макросъемки (b), фотография фрагмента взрыва проволоки с элементом окружности в режиме макросъемки при отсутствии пробоя (c).

цесс $1 \mu\text{s}$, форма оболочки осталась целой с небольшими локальными разрушениями. Данный механизм локального разрыва оболочки в процессе взрыва хорошо виден на фотографии, приведенной на рис. 7, с, где стрелками показаны места разрушения оболочки. Как указывалось в работе [4], одной из причин, препятствующей полному испарению капель расплавленной меди в процессе EW, является образование на их поверхности окисной пленки - оксида меди. Кроме того, здесь имеет место и вторичное явление: покрытые слоем оксида капельки металла не сливаются при соприкосновении друг с другом, а дают агрегаты из твердых частиц [4].

Все перечисленные ранее требования к ионизованному образованию, чтобы оно могло положить начало пробую, реализуются в канале разрядного промежутка, образованного EW. Характеристики отдельных плазменных образований ($R_s \approx 0.5-4 \text{ mm}$, средние расстояния $3-5 \text{ mm}$ и температура $T \approx 3000-5000^\circ\text{C}$), в центре которых имеются сгустки перегретых капель и их агрегатов, а также пониженное содержание кислорода в канале приводят к значительному снижению средней напряженности электрического поля, необходимой для пробоя. Следует отметить, что размеры отдельных плазменных образований на один-два порядка больше размеров перегретых капель вещества проволоки. Известно также, что в них, возможно, не более чем тройное усиление напряженности электрического поля. Дальнейшие исследования должны выявить новые факторы, приводящие к пробую в канале, образованном EW при $E_c \approx 53 \text{ V/cm}$. Следует также отметить работу [44], посвященную исследованию канала лидерного разряда. В ней показано, что сопротивление единицы длины канала лидера положительного заторможенного разряда равно $11.8 \Omega/\text{cm}$, а продольный градиент в канале в конце лидерной фазы равен 55.5 V/cm . Основные параметры лидерного канала оказались теми же, что и в случае дугового разряда.

На рис. 8, *a, d* приведены фотографии фрагмента канала, образованного EW из меди (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 141 cm) при $U_0 = 11 \text{ kV}$ и $C = 3.4 \mu\text{F}$ в режиме макросъемки при наличии пробоя в канале. Виден сохранившийся элемент эмалевой оболочки в разрядном канале. Пробую канала соответствуют на рис. 8, *b, c* осциллограммы тока и свечения. На рис. 8, *a* хорошо видны неустойчивости в разрядном канале (не приводящие к обрыву тока) и характер протекания тока по разрядному каналу. Он течет в основном по оболочке (внешней поверхности) разрядного канала. В работе [18] высказано предположение, подтвержденное фотографией, о винтообразном характере протекания электрического тока в процессе пробоя. Для этого есть веские основания, связанные с развитием винтовой и перетяжечной неустойчивостями. В работе [15] показано, что в стадии EW при протекании по проводнику тока большой плотности $\sim 1.6 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$ возникают и развиваются неустойчивости двух типов, приводящие к изменению формы проводника и далее к многочисленным его разрывам. В допороговом режиме в процессе нагрева и плавления развивается винтовая неустойчивость, связанная с

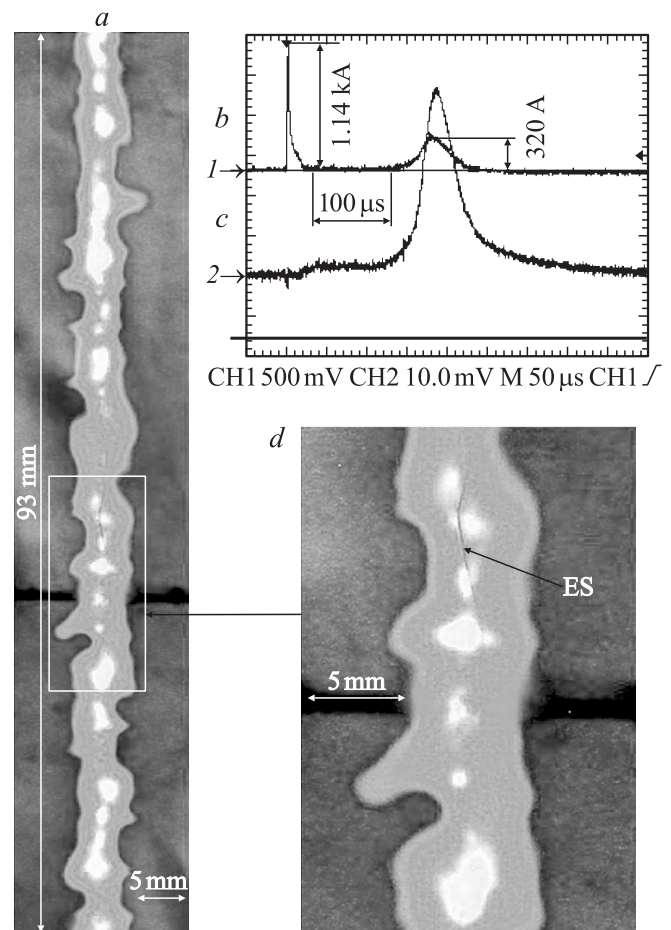


Рис. 8. Фотография фрагмента канала, образованного взрывающейся проволокой, в режиме макросъемки при наличии управляемого пробоя (*a*), осциллограммы тока (*b*) и свечения (*c*), увеличенный фрагмент фотографии (*d*). ES — эмалевая оболочка.

тем, что на этой стадии проволока стремится увеличить свою индуктивность [35] (приобрести форму спирали). Винтовая неустойчивость возникает и начинает развиваться до начала плавления проволоки. Далее в процессе плавления, когда проволока находится в жидкой фазе, развивается перетяжечная неустойчивость [15]. Перетяжечная неустойчивость развивается и рвет проводник на отдельные фрагменты за время $\sim 1 \mu\text{s}$. После EW в период паузы тока при $E_s \approx 53 \text{ V/cm}$ между отдельными фрагментами и их линейными агрегатами, находящимися при высокой температуре, в обе стороны распространяются волны ионизации (стримерная стадия), переходящие в лидерный процесс, который заканчивается дуговой стадией пробоя, точно так же, как в молнии. Импульс тока в стадии пробоя однополярный (даже при введении большой индуктивности) и имеет форму, близкую к току молнии в ее финальной стадии [3,5]. Средний диаметр разрядного канала на рис. 8, *d* $\sim 8 \text{ mm}$. При пробое, когда яркость свечения канала резко возрастает, форма регистрируемого импульса излучения на рис. 8, *c* близка к форме импульса тока и синхронна с ним по времени

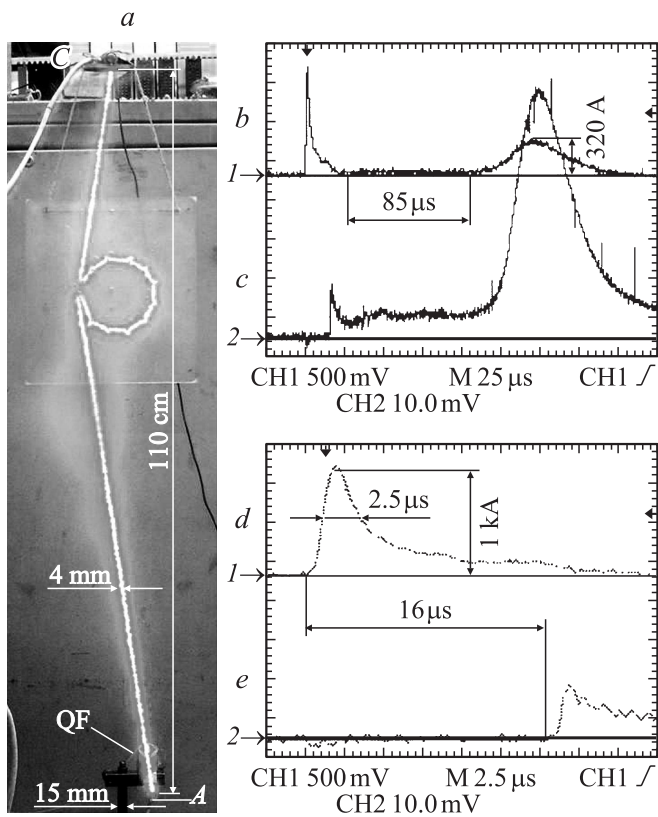


Рис. 9. Фотография управляемого пробоя с элементом окружности и зазором (общая длина ~ 142 см) (a), осциллограммы тока (b) и свечения (c), осциллограммы тока (d) и свечения (e) в другом масштабе времени. QF — кварцевое волокно.

(с задержкой менее $10 \mu\text{s}$ при начальной запасенной энергии ~ 2.1 кДж). Однако на осциллограмме свечения имеется небольшое отличие, а именно наличие пьедестала, начинающегося через $\sim 16 \mu\text{s}$ после начала EW.

На рис. 9, a приведена фотография канала, образованного EW из меди (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 142 см) при $U_0 = 11$ кВ и $C = 3.4 \mu\text{F}$ при наличии пробоя в канале с элементом окружности. На рис. 9, c, e на осциллограмме импульса излучения пьедестал имеет начальный всплеск в виде импульса с коротким фронтом и экспоненциальным спадом. Этот короткий импульс соответствует стримерному процессу, переходящему в лидерную стадию развития, предшествующую пробую, которой соответствует стадия протекания тока ~ 30 А в период паузы $\sim 85 \mu\text{s}$. В этот период канал разогревается и в нем происходит процесс термической ионизации [33] в дуговой стадии пробоя. По длительности пика на рис. 9, e и длительности пьедестала на рис. 9, c можно оценить скорость распространения стримера $v_s \approx 6 \cdot 10^7$ см/с и скорость распространения лидера $v_l \approx 1.9 \cdot 10^6$ см/с по каналу длиной 142 см, что хорошо согласуется с данными работы [33].

Для проверки влияния размеров отдельных плазменных образований в канале на механизм пробоя нами были проведены эксперименты с EW из меди

(диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 30–43 см) при $U_0 = 11$ кВ и $C = 4.5 \mu\text{F}$ с увеличенными удельными энергетическими параметрами. В этом случае присутствуют наночастицы вещества проволоки [6] и полностью отсутствуют крупные частицы (отдельные плазменные образования), что нарушает второе условие развития стримерного пробоя в канале. И как следствие, при приведенных выше электрических параметрах разрядной цепи и пятикратно сокращенного по длине промежутка электрического пробоя не происходило. На рис. 10, a приведена фотография канала, образованного EW из меди длиной 35.5 см, в режиме макросъемки при отсутствии пробоя в канале. Данному случаю соответствуют осциллограммы тока на рис. 10, b и напряжения на рис. 10, c. Количество энергии, затраченной на взрыв проволоки, оказалось ~ 43 Дж. Пробой наступал лишь при длинах более 59 см, когда начинало выполняться условие на размер плазменных образований в канале EW для реализации стримерного пробоя. На рис. 10, f приведена фотография канала, образованного EW из меди (диаметр $90 \mu\text{m}$, длина 59 см) при $U_0 = 11$ кВ и $C = 4.5 \mu\text{F}$ при наличии пробоя в канале. Пробую соответствуют осциллограммы напряжения (на рис. 10, d) и тока (на рис. 10, e).

Предположение об увеличении длительности тока пробоя при увеличении запасенной энергии подтвер-

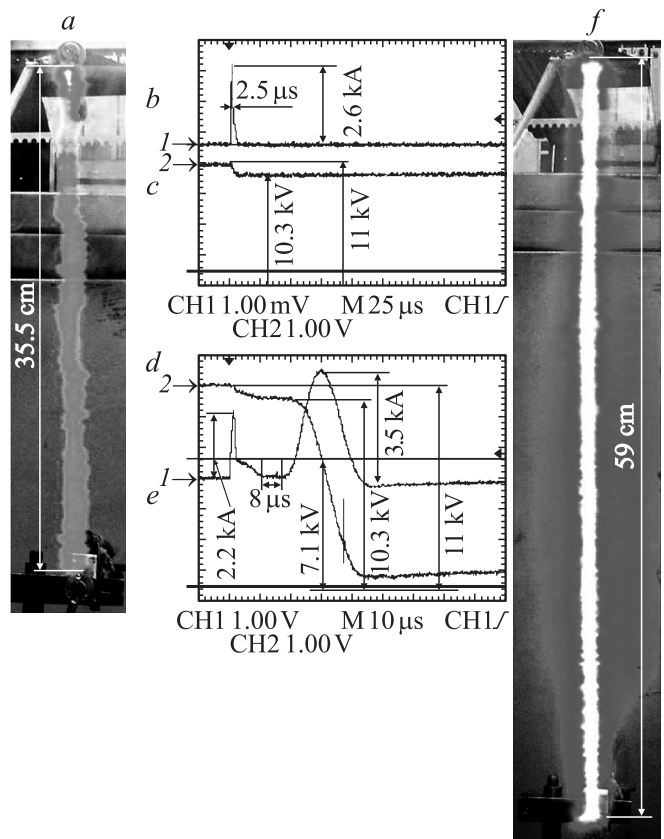


Рис. 10. Фотография канала, образованного взрывающейся проволокой длиной 35.5 см (a), осциллограммы тока (b) и напряжения (c), фотография управляемого пробоя длиной 59 см (f), осциллограммы напряжения (d) и тока (e).

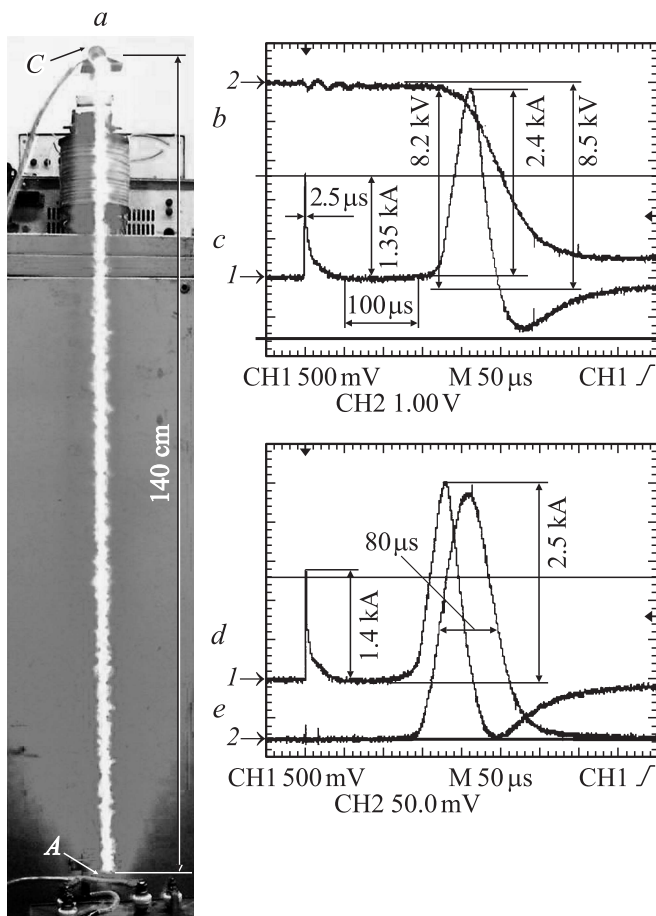


Рис. 11. Фотография управляемого пробоя (a), осциллограммы напряжения (b) и тока (c), осциллограммы тока (d) и свечения разрядного канала (e). A — анод; C — катод.

дильсь частично. Данные эксперимента по пробую в канале, образованном EW из меди (диаметр 90 μm, длина 140 см), при $U_0 = 8.5$ kV и $C = 39.5$ μF приведены на рис. 11. На рис. 11, a приведена фотография управляемого пробоя, которому соответствуют осциллограммы напряжения на рис. 11, b и тока на рис. 11, c, а также осциллограммы тока на рис. 11, d и свечения канала на рис. 11, e. Максимальное значение тока при пробое почти линейно зависит от запасенной энергии. Квазиколебательный характер затухания тока с большим декрементом затухания объясняется значительным уменьшением сопротивления канала при пробое до минимального значения ~ 3.1 Ω при увеличении его температуры и диаметра проводящей зоны. Следует отметить, что интегрирующая цепочка в поясе Роговского с постоянной интегрирования $\theta \approx 380$ μs дает ошибку измерения (при 15% сколе вершины) при длительности импульса тока более 30 μs. По этой причине на осциллограмме тока пробоя на заднем фронте имеются искажения. Время протекания тока (как следует из осциллограммы свечения на рис. 11, e) увеличилось лишь в 3 раза по сравнению с результатами, приведенными в работе [26]. Оцененный по фотографии на рис. 11, a средний диаметр

разрядного канала составил ~ 20 mm. Следует отметить, что режим управляемого пробоя с увеличенным запасом энергии представляет значительный интерес при моделировании процессов в стреловидном лидере молнии [3] и характера воздействия сильной цилиндрической ударной волны при движении тел с очень большими скоростями более 15 km/s.

Таким образом, для плазмы, полученной с помощью EW и содержащей совокупность дисперсионных и конденсационных аэрозолей в режиме электрического пробоя, минимальное удельное сопротивление разрядного промежутка 2.3 Ω/m и удельное пробивное напряжение $E_c \approx 5.3$ kV/m реализовано при вложенной удельной энергии ~ 600 J/m. Более подробно данный материал будет изложен в следующей публикации.

Результаты исследований также показали, что плазма в проведенных экспериментах обладала высокой проводимостью и может быть эффективно использована для реализации программы „Импульсар“ [1], связанной с созданием проводящего канала для передачи энергии на значительные расстояния.

Заключение

В экспериментах по управляемой коммутации протяженных промежутков длиной 59–190 см при приложенных напряжениях 7–11 kV в канале, образованном EW, получен режим электрического пробоя. Полное управление режимом пробоя получено в канале, образованном EW из меди (диаметр 90 μm, длина 59–190 см), при $U_0 = 10.3$ kV и $C = 39.5$ μF. Минимальная средняя напряженность электрического поля $E_c \approx 53$ V/cm в канале, реализующая механизм стримерно-лидерного пробоя разрядного промежутка, обусловлена следующими факторами:

1) наличием в канале совокупности дисперсионных и конденсационных аэрозолей горячих частиц оксида меди (CuO, Cu₂O) и меди с окисленной поверхностью диаметром менее 300 μm, существующих в течение длительного времени 1–10 ms вследствие их малой подвижности;

2) наличием перегретых капель металла в центре плазменных образований, находящихся в метастабильном неустойчивом состоянии при температуре $T \approx 3000$ –5000 °C, которые играют роль горячих точек [18] в процессе термоэлектронной эмиссии;

3) образованием крупных линейных агрегатов частиц аэрозолей [4] и пониженным содержанием кислорода в канале в результате их быстрого окисления при EW.

Исследованный нами электрический пробой в атмосфере, точно так же как и в молнии, в своей заключительной фазе представляет собой дуговой разряд с максимальной равновесной температурой, не превышающей в данных условиях эксперимента 8000 K.

В связи с этим нанопорошок меди и оксида меди (CuO, Cu₂O) может рассматриваться как перспективный наполнитель топливной системы лазерного реактивного

двигателя в проекте „Импульсар“ как для создания проводящего канала для передачи энергии на значительные расстояния, так и с точки зрения увеличения создаваемой лазерным излучением тяги двигателя.

В отличие от работ [24,25] используемая нами методика определения вольт-амперных характеристик электрического пробоя позволяет с точностью до 5% определить его основные характеристики, а именно удельное пробивное напряжение и динамику изменения удельного сопротивления разрядного промежутка. Это позволяет более точно оценивать значения пробойного напряжения и удельного энерговклада при масштабировании управляемого пробоя на больших длинах.

Авторы благодарны В.Р. Сороченко за обсуждение экспериментальных результатов, С.Ю. Казанцеву, Н.Б. Пономареву за помощь в работе, С.М. Першину за полезные критические замечания. Авторы признательны В.А. Ракову (Professor of the University of Florida's (UF) Department of Electrical and Computer Engineering) за любезно предоставленные фотографии триггерных молний.

Список литературы

- [1] Аполлонов В.В., Вагин Ю.С. Патент на изобретение „Способ создания токопроводящих каналов в непроводящей среде“, № 2 400 005 от 20.05.09.
- [2] Apollonov V.V., Pletnev N.V. // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7751. P. 118–123.
- [3] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [4] Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 352 с.
- [5] Кариорис Ф., Фиш Б., Ройстер Г. Exploding wires. Vol. 2. N.Y.: Plenum Press, 1962. Русский перевод: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: Мир, 1965. С. 341–355.
- [6] Интернет-сайт: <http://www.nanosized-powders.com>.
- [7] Аполлонов В.В., Василяк Л.М., Казанцев С.Ю. и др. // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 2. С. 115–120.
- [8] Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Устиновский Н.Н. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 3. С. 227–233.
- [9] Exploding wires. Vol. 1. N.Y.: Plenum Press, 1959. Русский перевод: Взрывающиеся проволочки. Т. 1. М.: ИЛ, 1963. 342 с.
- [10] Бондаренко В.В., Кварцхава И.Ф., Плотто А.А., Чернов А.А. // ЖЭТФ. 1955. Т. 28. С. 191–198.
- [11] Кварцхава И.Ф., Плотто А.А., Чернов А.А., Бондаренко В.В. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 42–53.
- [12] Muller W. // Z. Physik. 1957. Bd. 149. S. 397–411.
- [13] Протопопов Н.А., Кульгавчук В.М. // ЖТФ. 1961. Т. 31. С. 557–564.
- [14] Перегуд Б.П., Абрамова К.Б. // ДАН СССР. 1964. Т. 157. С. 837–840.
- [15] Абрамова К.Б., Валицкий В.П., Вандакуров Ю.В., Златин Н.А., Перегуд Б.П. // ДАН СССР. 1966. Т. 167. С. 778–781.
- [16] Кульгавчук В.М., Новоскольцева Г.А. // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 549–556.
- [17] Vlastos A.E. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 4993–4998.
- [18] Vlastos A.E. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 3081–3087.
- [19] Vlastos A.E. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. P. 2193–2196.
- [20] Александров А.Ф., Зосимов В.В., Курдюмов С.П., Попов Ю.П., Рухадзе А.А., Тимофеев И.Б. // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 1841–1854.
- [21] Лебедев С.В., Савватимский А.И. // УФН. 1984. Т. 144. С. 215–250.
- [22] Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Романова В.М., Глазырин И.В., Котова О.Г., Слесарева А.Н. Препринт ФИАН. № 9. М., 2004. 26 с.
- [23] Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М.: Атомиздат, 1976. 184 с. Изд. 2-е. М.: Книжный дом „ЛИБРОКОМ“, 2012. 184 с.
- [24] Sinton R., van Herel R., Enrigh W., Bodger P. // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 053 304.1–053 304.4.
- [25] Sinton R., van Herel R., Enrigh W., Bodger P. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 093 303.1–093 303.4.
- [26] Аполлонов В.В., Плетнев Н.В. // Квант. электрон. 2012. Т. 42. № 2. С. 130–139.
- [27] Uman M. The Lightning Discharge. N.Y.: Acad. Press, 1987. 377 p.
- [28] Newman M.M., Stahmann J.R., Robb J.D., Lewis E.A., Martin S.G., Zinn S.V. // J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 4761–4764.
- [29] Hubert P., Laroche P., Eybert-Berard A., Barret L. // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. P. 2511–2521.
- [30] Fisher R.J., Schnetzer G.H., Thottappillil R. et al. // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 22 887–22 902.
- [31] Wang D., Rakov V.A., Uman M.A. et al. // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 4213–4222.
- [32] Александров Г.Н. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 2. С. 288–293.
- [33] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997. 320 с.
- [34] Герасименко Н.И., Грашина Н.А., Медведков А.Г., Мещеряков А.Б., Плетнев Н.В. // ПТЭ. 1988. № 1, С. 212–215.
- [35] Гончаренко Г.М. Труды МЭИ. Вып. 45. Электроэнергетика. М.: МЭИ, 1963. 169 с.
- [36] Насонов А.Г., Ланцман Л.С. // ПТЭ. 1984. № 2, С. 134–135.
- [37] Мартынюк М.М. // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 1262–1270.
- [38] Кикоин И.К., Сенченков А.П. // ФММ. 1967. Т. 24. С. 843–858.
- [39] Курлин М.В., Панова Я.И., Пасынков В.В., Таиров В.Н. Электрорадиоматериалы. Л.: Судостроение, 1969. 339 с.
- [40] Зельдович Я., Ландау Л. // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. С. 32–34.
- [41] Гаврилов В.Н., Литвинов Е.А. // ПМТФ. 1993. Т. 34. С. 28–34.
- [42] Базелян Э.М., Гончаров В.А., Горюнов А.Ю. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 2. С. 154–158.
- [43] Александров Д.С., Базелян Э.М., Бекжанов Б.И. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 120–127.
- [44] Комельков В.С. // ДАН СССР. 1947. Т. 58. С. 57–60.
- [45] Александров Г.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 12. С. 101–105.