ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ДИОДЕ С ОСТРИЙНЫМ КАТОДОМ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

 $E.\ B.\ \Pi$ аркевич $^{a,b^*},\ C.\ И.\ Ткаченко <math>^b,\ A.\ B.\ A$ гафонов $^{a,c},\ A.\ P.\ Мингалеев <math>^a,\ B.\ M.\ Романова\ ^a,\ T.\ A.\ Шелковенко\ ^a,\ C.\ A.\ Пикуз\ ^a$

^а Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук 119991 Москва, Россия

> ^b Московский физико-технический институт 141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

 c Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» $115409,\ Mocква,\ Poccuя$

Поступила в редакцию 9 сентября 2016 г.

Лазерными методами (одновременное применение многокадровой интерферометрии, теневого и шлирен-фотографирования) исследована предпробойная стадия газового разряда в диоде с сильной перенапряженностью поля на катоде при атмосферном давлении. Пространственное разрешение методов составляет приблизительно $20\,$ мкм. Зондирующий импульс лазера (Nd:YAG-лазер LS-2151 с длительностью импульса на полувысоте $70\,$ пс, энергией в импульсе до $40\,$ мДж) синхронизован с импульсом напряжения с точностью примерно $1\,$ нс. Большая напряженность поля на катоде достигается использованием на электродах тонких одиночных металлических острий. Показано, что начальная стадия пробоя разрядного промежутка сопровождается появлением на торце острия облака плотной плазмы с электронной плотностью около $5\cdot10^{19}\,$ см $^{-3}\,$ масштабом в десятки микрон, а также резким ростом суммарного тока в диоде. После появления на торце катодного острия плотного облака плазмы аналогичное образование формируется на поверхности анода, после чего происходит их смыкание и образование трубчатого токового канала. Динамика пробоя, а также параметры возникающей плазмы регистрировались посредством указанных выше методик по трем независимым оптическим каналам, разнесенным по времени.

DOI: 10.7868/S0044451017040010

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование импульсного разряда в различных газах и в воздухе является актуальной задачей во многих приложениях, в первую очередь это относится к разрядникам, наполняемым газом различного давления. Наименее изучена предпробойная стадия разряда (до образования плазменного токового канала между электродами), хотя именно процессы на данной стадии разряда во многом определяют параметры высоковольтных разрядников. Данные о физической картине происходящих процессов на ранней стадии разряда приведены в различных работах

[1–3]. Недостаток информации о плазме, формирующейся на разных стадиях разряда, в первую очередь на начальной, связан с трудностью диагностики быстропротекающих процессов с высоким пространственным (микроны) и временным (наносекунды и меньше) разрешением. Поэтому развитие диагностик в этом направлении представляется крайне важной задачей.

В том случае если осуществляется регистрация свечения разряда в различных его стадиях развития посредством камер кадровой или высокоскоростной хронографической съемки, очень сложно получить информацию о количественных характеристиках разрядной плазмы, например, об электронной плотности в локальной области разрядного промежутка, о характерных градиентах плотности. Проблема решается посредством методов лазер-

^{*} E-mail: parkevich@phystech.edu

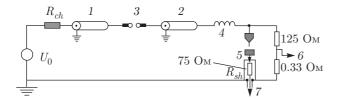


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема установки: U_0 — источник постоянного напряжения, R_3 — зарядное сопротивление, 1 — формирующая линия, 2 — передающая линия, 3 — пятиканальный разрядник с лазерным поджигом, 4 — индуктивность подвода l, 5 — исследуемый диод с острийным катодом, 6 — делитель напряжения, 7 — шунт

ного зондирования [4], которые прекрасно сочетаются с такими же регистраторами, что позволяет получать в том числе и временные развертки зондирующего лазерного луча, прошедшего исследуемый объект. В данной работе представлены предварительные результаты по применению лазерных методов зондирования (многокадровая интерферометрия, теневое и шлирен-фотографирование) разрядного промежутка с высоким пространственным разрешением.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для исследования предпробойной стадии газового разряда при атмосферном давлении в диоде с острийным катодом создана компактная установка, в которой была достигнута высокая точность синхронизации зондирующего луча лазера и импульса напряжения, подаваемого на исследуемый диод; для получения изображений разрядного промежутка с высоким пространственным разрешением использованы лазерные диагностики.

Напряжение, подаваемое на диод, формируется кабельным генератором с управляемым коммутатором. Эквивалентная электрическая схема установки изображена на рис. 1, устройство разрядной камеры — на рис. 2.

Формирующая линия генератора образована пятью отрезками кабеля PK-50-9-11; линия заряжается через сопротивление 1 ГОм от регулируемого источника постоянного напряжения U_0 (максимум до 30 кВ). Коммутация кабелей осуществляется разрядником, наполняемым сухим воздухом при давлении до 5 атм. Длительность импульса напряжения составляет 150 нс.

Электрические сигналы с датчиков регистрируются цифровыми осциллографами Tektronix TDS

3054В с полосой пропускания 500 МГц. Напряжение на катоде измеряется с помощью широкополосного резистивного делителя с сопротивлением верхнего плеча 125 Ом, нижнего — 0.33 Ом (10 на рис. 2a), изготовленного из резисторов марки ТВО; для регистрации суммарного тока через исследуемый диод используется шунт коаксиальной конфигурации, следующий сразу после анода (4 на рис. 2a) с сопротивлением 33 мОм, изготовленный из резисторов марки МЛТ. Между точкой крепления шунта с анодом и разъемом под измерительный кабель RG-6 вставлено согласованное сопротивление 75 Ом для уменьшения наводок в измерительном тракте: уровень наводок в показаниях шунта в момент выстрела не превышал 20 мВ. Временное разрешение делителя и шунта составляет около 1 нс. Фронт импульса напряжения с амплитудой 10 кВ в режиме работы установки на несогласованную нагрузку с сопротивлением 125 Ом составлял 20 нс.

Схема диода с геометрией острие—плоскость приведена на рис. 26. Острие изготавливалось из медных или молибденовых проволочек диаметром 10 мкм и более; плоский анод диаметром 8 мм сделан из нержавеющей стали. Длина проволочек изменялась от 500 мкм до 1 см, величина зазора между концом проволочки и анодом — от 0 до 1 см (длина зазора в каждом конкретном выстреле определялась по теневым изображениям, полученным до подачи импульса напряжения). Максимальное расстояние между основными электродами 2 см. Для лучшего электрического контакта проволочки припаивались к вершине латунного штока, который являлся катодом диода.

В установке используется пикосекундный Nd:YAG-лазер LS-2151 (длительность импульса на полувысоте 70 пс, энергия в импульсе до 40 мДж; две гармоники $\lambda=1064$ нм и $\lambda=532$ нм). Часть основного лазерного пучка (примерно 96 %) используется для поджига пятикабельного разрядника, другая — для зондирования разряда. Время срабатывания разрядника составляет примерно 40 нс при энергии в импульсе лазера 30 мДж. При зарядном напряжении $U_0=21$ кВ разброс в срабатывании не превышает 1 нс [5].

Для исследования динамики протекающих процессов зондирующий пучок делился на три канала при помощи системы задержки (см. рис. 3). Временной интервал между первым и вторым кадром составлял 2 нс, между вторым и третьим — 11 нс; отсчет времени проводится от момента прихода импульса напряжения на нагрузку. В каждом выстреле регистрировались три лазерных изображения: ин-

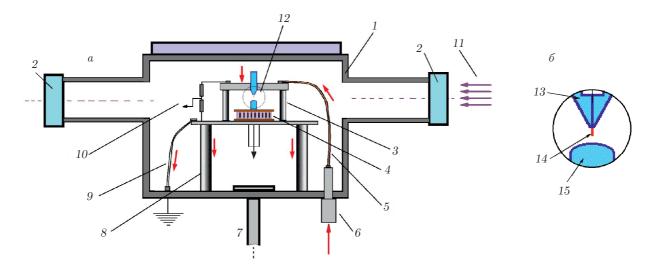


Рис. 2. a) Устройство разрядной камеры: 1 — корпус разрядной камеры, 2 — диагностические окна из стекла, 3 — диэлектрические стойки, 4 — анодный шунт, 5 — отрезок подводящего кабеля, 6 — согласованный вакуумноплотный ввод, 7 — откачной патрубок, 8 — металлические стойки, 9 — шнур заземления, 10 — делитель напряжения, 11 — зондирующий лазерный пучок, 12 — исследуемый диод. Стрелками указано направление протекания электронного тока. 6) Схема исследуемого диода: 13 — катод, 14 — острие, 15 — анод

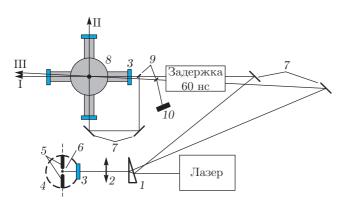


Рис. 3. Схема разделения лазерного пучка: 1 — клин, 2 — собирающая линза, 3 — стеклянное окно, 4 — корпус разрядника, 5 — электроды, 6 — искра, 7 — зеркала, 8 — корпус разрядной камеры, 9 — делительные пластины, 10 — фотодатчик; I, II, III — лазерные пучки (между I и II задержка 2 нс, между I и III задержка 11 нс)

терферограмма, теневое и шлирен-изображение (оптическая схема показана на рис. 4). Используемая схема позволяет получать изображения с пространственным разрешением 20 мкм при расстоянии от объекта до первой линзы 90 см. Для сбора лазерного излучения (1), прошедшего исследуемый объект (2), использовались телескопические объективы SIGMA70-300mmF4-5.6DG MACRO (3), а также короткофокусные объективы Canon EF-S 18–55 мм (5). Пучок лазера, прошедший исследуемый объект,

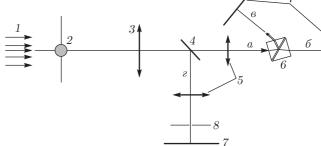


Рис. 4. Оптическая схема одного оптического канала: 1— зондирующий лазерный пучок, 2— исследуемый объект, 3— телескопический объектив, 4— делительная пластина, 5— короткофокусные объективы, 6— интерферометр на воздушном клине, 7— цифровые фотоаппараты, 8— асимметричная шлирен-диафрагма

делился на две части $(a \ u \ z)$ делительной пластиной (4). Увеличенные изображения исследуемой области разряда регистрировались цифровыми фотоаппаратами Canon EOS 1100D и Canon EOS 1000D (7), перед которыми стояли один нейтральный и два зеленых светофильтра. В течение выстрела затворы фотоаппаратов были открыты, поэтому время экспозиции каждого кадра равно длительности лазерного импульса — $70\ \text{nc}$, а временной интервал между кадрами устанавливался при помощи системы задержки.

Часть a пучка служит для получения интерференционной и теневой картин объекта (части δ ,

N	Материал проволочки	d, mkm	l, mkm	h, MKM	U_0 , кВ	t_n , нс	U_n , кВ	I_{max} , A
160415-1	Мо	30	1112	1020	17	19	4	800
160119-3	Cu	10	1390	1342	19	24-25	7.7	800
160406-1	Cu	10	480	620	17	25-26	6.5	700
160415-3	Mo	25	480	1360	17	23	9	700

Таблица. Основные параметры выстрелов

Примечание. N — номер выстрела, d — диаметр проволочки, l — длина ее проекции на ось диода, h — зазор между торцом проволочки и анодом, U_0 — зарядное напряжение, t_n — момент пробоя (начало резкого роста тока через диод), U_n — пробойное напряжение, I_{max} — максимальный ток через диод.

в) — в работе использована схема интерферометра на воздушном микроклине (6) [6,7]. Другая часть лучей (г) задействована в схеме с асимметричной шлирен-диафрагмой (8) для регистрации картины в рефрагированных лучах [8,9].

Момент прихода лазерного пучка в разрядную камеру определяется фронтом сигнала (по относительному уровню 0.1) с фотодатчика THORLABS-DET10A/M. Датчик располагается в третьем оптическом канале, поэтому моменты времени, в которые получены изображения, определяются соответственно задержке импульса относительно третьего канала. Временное разрешение датчика приблизительно 1 нс в спектральном диапазоне 200–1100 нм. Длительность и амплитуда сигнала фотодатчика могли меняться от выстрела к выстрелу из-за большой мощности падающего лазерного пучка, что переводило датчик в нелинейный режим насыщения.

Регулируемый напуск воздуха в разрядник и регулировка мощности лазера позволяют легко синхронизовать момент зондирования лазерным пучком разряда относительно момента прихода импульса напряжения на исследуемую нагрузку. Варьируя только зарядное напряжение, можно сдвигать момент зондирования относительно момента прихода импульса напряжения в интервале 10–20 нс без изменения оптической задержки лазера.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже приведены серии фотографий, соответствующих различным стадиям пробоя. Теневые изображения, полученные на ранней стадии разряда (исследуемой в данной статье), оказались малоинформативными ввиду того, что на них

можно зарегистрировать только объекты с большой плотностью или большими градиентами плотности. Основные параметры выстрелов приведены в таблице.

На рис. 5, 6 представлены интерферограммы и шлирен-изображения диода до подачи напряжения на диод и через 25 нс после прихода импульса напряжения. Сигналы с датчиков показаны на рис. 5∂ ,е. Зазоры между торцом проволочки и анодом, измеренные по теневому изображению, полученному до выстрела, приведены в таблице. На рис. 5e видно, что резкое возрастание тока начинается на 23-24 нс; до этого шунт регистрирует плавное возрастание тока смещения (до 1.5 A) за счет увеличения напряжения на диоде. На рис. 6 приведены увеличенные изображения торцевой области, показывающие облако плазмы, распространяющееся в сторону анода.

Прогибы интерференционных полос на рис. 66 соответствуют объекту с показателем преломления n < 1. В соответствии с совмещенными интерферограммой и шлирен-изображением (рис. 6д) характерные масштабы облака приблизительно составляют: в продольном направлении 160 мкм, в поперечном 60 мкм. На рис. 5в приведено нулевое шлирен-изображение диода. Проволочка имеет диффузную границу, хотя на шлирен-фотографии вообще не должен быть виден непрозрачный объект. Изображение возникает вследствие дифракции зондирующего пучка на проволочке малого диаметра. При исследовании начальной стадии разряда точка фокуса в канале шлирен-фотографирования была не сильно смещена относительно кромки ножа, что позволило регистрировать слабые градиенты показателя преломления. Оптическая схема построения шлирен-изображения (подробнее см. в [8, 9]) такова, что в предположении цилиндрической симмет-

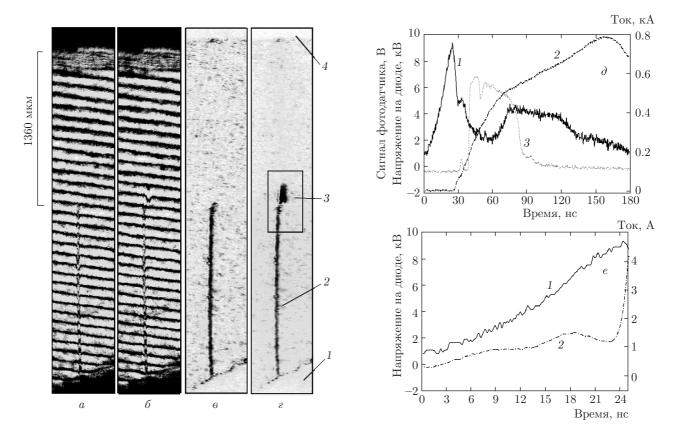


Рис. 5. Выстрел № 160415-3. Интерферограммы (a,δ) и шлирен-изображения (s,ϵ) , полученные до выстрела (a,ϵ) и через 25 нс после подачи импульса напряжения на диод (δ,ϵ) . Продольный и поперечный масштабы одинаковы. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — дифракционное изображение проволочки, 3 — катодное облако плазмы, 4 — анод. ∂, e — Сигналы с датчиков в первые 180 нс и в увеличенном масштабе в первые 25 нс: 1, 2 — осциллограммы соответственно напряжения и тока, 3 — сигнал с фотодатчика

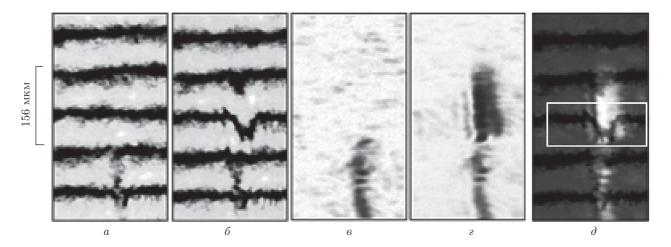


Рис. 6. a–e) Увеличенные изображения приторцевых областей острия, показанных соответственно на рис. 5a–e (на рис. 5e область обозначена прямоугольником). d) Совмещенные интерферограмма (b) и шлирен-изображение (e). Продольный и поперечный масштабы одинаковы

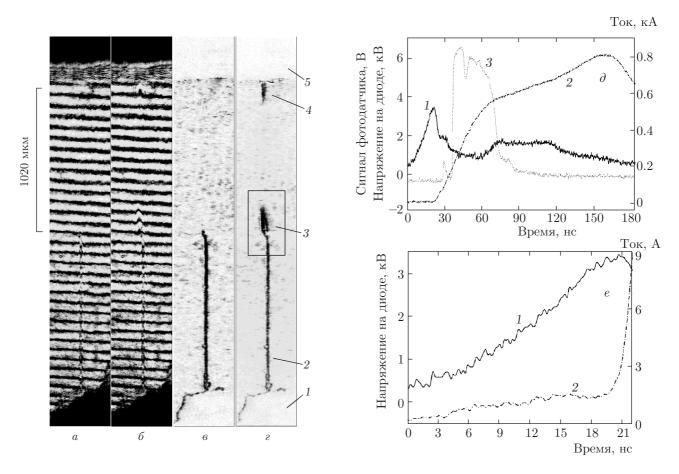


Рис. 7. Выстрел № 160415-1. Интерферограммы (a, 6) и шлирен-изображения (e, e), полученные до выстрела (a, 6) и через 21.5 нс после подачи импульса напряжения на диод (6, e). Продольный и поперечный масштабы одинаковы. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — дифракционное изображение проволочки, 3 — катодное облако плазмы, 4 — анодное облако плазмы, 5 — анод. ∂ , e — Сигналы с датчиков в первые 180 нс (∂) и в первые 22 нс (e): 1, 2 — осциллограммы соответственно напряжения и тока, 3 — сигнал с фотодатчика

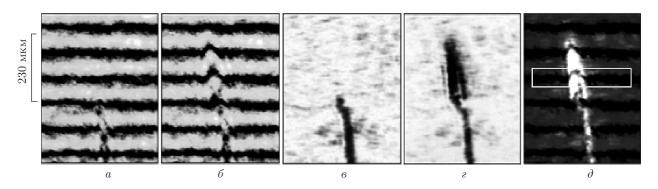


Рис. 8. a–e) Увеличенные изображения приторцевых областей острия, показанных соответственно на рис. 7a–e (на рис. 7e увеличенная область обозначена прямоугольником). d) Совмещенные интерферограмма и шлирен-изображение. Продольный и поперечный масштабы одинаковы

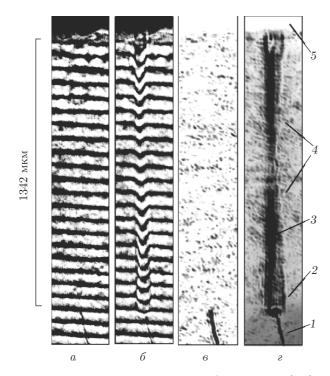


Рис. 9. Выстрел № 160119-3. Интерферограммы (a,δ) и шлирен-изображения (e,ε) , полученные до подачи импульса напряжения (a,ε) и через 38 нс после его прихода (δ,ε) . Продольный и поперечный масштабы одинаковы. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — дифракционное изображение проволочки, 2 — рефракция в области с $n>1,\ 3$ — рефракция в области с $n<1,\ 4$ — область смыкания плазменных образований, 5 — анод

рии объекта правая часть изображения, приведенного на рис. 6г, соответствует рефракции на объекте с коэффициентом преломления n < 1. В этом случае тоненькая полоска с поперечным размером около 10 мкм в левой части изображения должна соответствовать рефракции на объекте с n > 1. Она может появляться в результате рефракции лучей на ударной волне. С другой стороны (если объект не осесимметричен), данная структура вполне может оказаться еще одним плазменным объектом с меньшим градиентом электронной плотности, а наблюдаемый объект (катодное облако) может представлять собой набор плазменных образований масштабом несколько микрон, возникших на поверхности торца острия в локальных точках усиления поля (на микроостриях). Однако для подтверждения этого необходимо на порядок улучшить пространственное разрешение.

Максимальный сдвиг интерференционной полосы в выделенной прямоугольником области на рис. 6∂ составляет примерно половину расстояния

между полосами, k=0.5. Поперечный масштаб области, имеющей такой сдвиг, приблизительно равен 40 мкм, следовательно, электронная плотность этого объекта $5.2 \cdot 10^{19}~{\rm cm}^{-3}$.

На приведенных изображениях (рис. 5) в промежутке между плазмой, сформированной на торце проволочки, и анодом отсутствуют признаки какого-либо плазменного канала. Следовательно, либо этот канал на данной стадии еще не успел сформироваться, а резкое возрастание сигнала от шунта с 23 нс обусловлено током смещения, связанным с изменением емкости диода из-за продвижения вершины облака плазмы в сторону анода, либо чувствительность используемых методов недостаточна для его регистрации. Это возможно при характерном масштабе канала менее нескольких микрон и слабом градиенте показателя преломления на его границах.

На рис. 7, 8 приведены фотографии острийного диода до подачи импульса напряжения и через 21.5 нс после его прихода. Изгиб полос на рис. 76соответствует объекту с показателем преломления n < 1, как и на рис. 5 (здесь используется второе из двух изображений, регистрируемых на одном кадре сдвиговым интерферометром). В качестве острия использовалась молибденовая проволочка диаметром 30 мкм. Основные параметры выстрела указаны в таблице (выстрел № 160415-1). В данном выстреле представлена чуть более поздняя стадия, на которой запечатлены уже два протяженных плазменных образования — одно на катоде, другое на аноде. При этом катодное образование по своей структуре похоже на образование на рис. 5г, и соответствующий прогиб интерференционных полос соответствует примерно такой же электронной плотности. В области расположения анодного образования также заметен прогиб интерференционной полосы, однако величину сдвига определить невозможно, поскольку его поперечный масштаб меньше пространственного разрешения.

На рис. 7e видно, что резкое возрастание тока начинается с 20 нс. До этого шунт регистрирует плавное возрастание тока смещения (до $1.5~\mathrm{A}$) за счет роста напряжения на диоде. На 21.5 нс анодный шунт регистрирует увеличение суммарного тока через диод до $6.2~\mathrm{A}$ при напряжении $4~\mathrm{kB}$. Средняя скорость увеличения тока в интервале $21-25~\mathrm{hc}$ составляет $5.9~\mathrm{A/hc}$.

На рис. 9 представлена более поздняя стадия разряда — через 13 нс после пробоя. Видно, что катодное и анодное образования сливаются, формируя четко видимый токовый канал разряда. В этот мо-

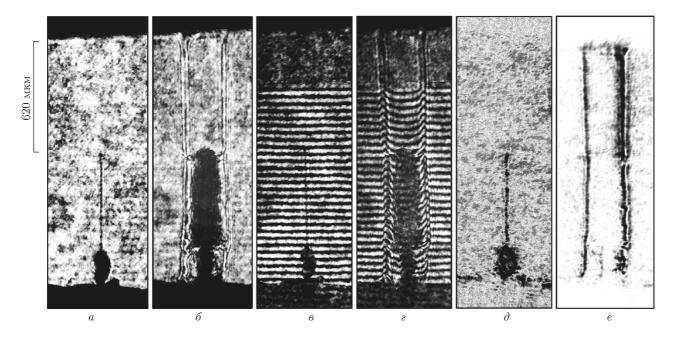


Рис. 10. Выстрел № 160406-1. Тенеграммы (a, 6), интерферограммы (a, e), шлирен-изображения (a, e), полученные до подачи импульса напряжения (a, e, a) и через 112 нс после его прихода (a, e, e). Продольный и поперечный масштабы одинаковы

мент суммарный ток через диод равен 157 A, напряжение — 3.7 кВ.

На рис. 10 показана поздняя стадия разряда. Изображения получены на 112 нс после прихода импульса напряжения и приблизительно через 90 нс после пробоя. Видно, что разрядный канал имеет трубчатую структуру. В этот момент суммарный ток через диод составляет около 600 А. На фотографиях в нижней части проволочки видно утолщение, оставшееся после пайки. Эта часть проволочки практически не взорвалась из-за меньшего удельного энерговклада.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совместный анализ изображений и осциллограмм тока нескольких серий экспериментов показал, что появление плазменного образования на торце острия сопровождается резким скачком суммарного тока через диод. Характерный временной масштаб возникновения токового канала в зазоре острие—анод составляет около 10 нс от момента возникновения катодного облака плазмы. Динамика этого процесса на основе полученных данных представляется следующим образом: сначала возникает плазменное образование на торце острия, далее спустя примерно 1 нс (при зазоре между торцом

проволочки и анодом около 1 мм) возникает плазменная затравка на поверхности анода, из которой формируется анодное образование, после чего происходит его смыкание с катодным образованием. Однако проследить момент образования плазменной затравки на аноде оказалось крайне сложно. Судя по всему, временной масштаб данной стадии не больше 1 нс. Отследить промежуточную стадию возникновения плазменного образования на аноде из данной затравки удалось в некоторых выстрелах. В качестве иллюстрации на рис. 11, 12 приведены результаты одного из таких выстрелов № 160119-2. В данном выстреле в качестве острия использовалась медная проволочка диаметром 10 мкм. На рис. 12 в увеличенном масштабе представлены те области изображения, которые отмечены прямоугольниками на рис. 11г.

На поверхности анода заметны плазменные «затравки» (3 на рис. 12). Также слабо прослеживаются плазменные микроканалы, идущие в сторону катода. В данном выстреле в канале регистрации отсутствовал один нейтральный фильтр, поэтому эти микроканалы могут соответствовать интегральному свечению. Заметим, что на «нулевом» (полученном до выстрела) изображении на поверхности анода заметны темные области (1 на рис. 12a). Подобные структуры могут представлять собой либо ди-

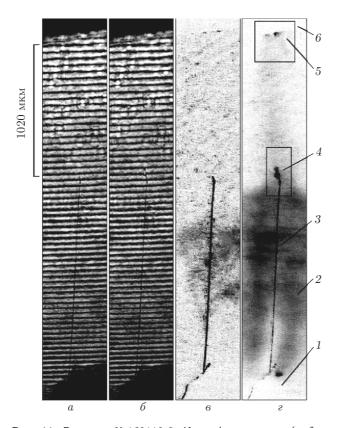


Рис. 11. Выстрел № 160119-2. Интерферограммы (a, δ) и шлирен-изображения (s, ϵ) , полученные до подачи импульса напряжения (a, ϵ) и через 30 нс после его прихода (δ, ϵ) . Продольный и поперечный масштабы одинаковы. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — интегральное свечение, 3 — дифракционное изображение проволочки, 4 — катодное облако плазмы, 5 — «затравки» на аноде, 6 — анод

фракционные изображения различных неоднородностей на поверхности анода, либо искажения вследствие дефектов оптики. На рис. 11 г видно диффузное облако вокруг острия (2), оно может соответствовать максимуму интенсивности интегрального по времени (~ 2 мкс) свечения разрядного промежутка, прошедшей сквозь набор светофильтров. Подобные изображения часто возникали при использовании медной проволочки диаметром 10 мкм в качестве острия. Область сильного собственного свечения плазмы лучше видна на шлирен-изображении из-за существенно меньшей интенсивности фона лазерной подсветки при ее получении.

Максимальный сдвиг интерференционной полосы вблизи торца острия на рис. 12s достигается на масштабе приблизительно 20 мкм и составляет примерно k=0.2, что соответствует электронной плотности $4\cdot 10^{19}$ см⁻³. Необходимо отметить, что эта

величина, как и указанная выше, несколько превышает значение, которое было бы получено в случае однократно ионизованного воздуха — $2.7 \cdot 10^{19} \; {\rm cm}^{-3}$ при нормальных условиях. Такое большое значение можно объяснить либо многократной ионизацией воздуха, либо влиянием взрывоэмиссионной плазмы, вносящей дополнительный вклад в сдвиг полосы. Заметим, что характерные значения электронной плотности практически не зависели от материала катодного острия.

Для оценки электронной плотности использовалось выражение [4], при выводе которого предполагалось, что частота лазера лежит вдали от частот всех резонансных переходов присутствующих в разряде частиц и что частота столкновений электронов с нейтральными атомами много меньше частоты зондирующего лазера:

$$n \approx 1 - 4.49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e$$

где n — показатель преломления, λ [см] — длина волны лазера, N_e [см $^{-3}$] — плотность электронов, A [см] = $4.49\cdot 10^{-14}$ — размерный коэффициент.

Отметим, что дополнительный вклад в показатель преломления могло бы давать вытеснение нагретого воздуха (нейтральных атомов) из объема плазменного частично ионизованного объекта. В нашем случае на начальной стадии разряда этим эффектом можно пренебречь.

По нескольким изображениям диодного промежутка, полученным в одном выстреле, определено, что средняя скорость распространения в продольном направлении для катодного облака плазмы составляла около 25 км/с, а у анодного облака она могла меняться от выстрела к выстрелу и как превышать, так и быть меньше скорости распространения катодного. Средняя скорость расширения в поперечном направлении этих объектов была одинаковой и составляла 5 км/с.

Представленные результаты, хотя и являются предварительными, демонстрируют сложность пространственной структуры плазменных объектов на начальной стадии разряда и указывают на необходимость проведения дополнительных исследований процессов возникновения катодного и анодного сгустков плазмы. Это может оказаться важным для понимания физики фундаментальных процессов, играющих ключевую роль на предпробойной стадии газового разряда.

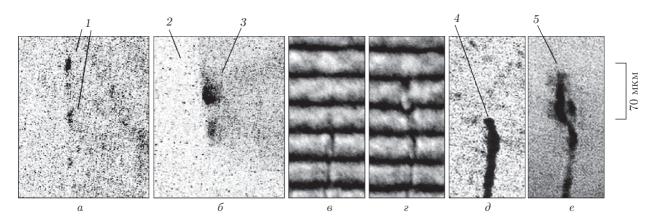


Рис. 12. Увеличенные изображения анода (a,δ) и торца проволочки (e-e) (обозначены на рис. 11ε прямоугольниками). Шлирен-изображения анода (a,δ) повернуты на 90° относительно первоначального положения выделенной области. Продольный и поперечный масштабы одинаковы. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — неоднородности на поверхности анода, 2 — анод, 3 — плазменные затравки на аноде, 4 — дифракционное изображение проволочки, 5 — катодное облако плазмы

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С высоким пространственным (20 мкм) разрешением получены экспериментальные данные о предпробойной стадии и развитии разряда в импульсном высоковольтном диоде с острийным катодом. Эксперименты проводились при атмосферном давлении в воздухе. Показано, что начальная стадия разряда сопровождается появлением плотного облака плазмы на торце острия с электронной плотностью примерно $5 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$. Определены характерные скорости расширения облака, которые составили приблизительно 25 км/с в продольном и 5 км/с в поперечном направлениях. Данные значения практически не зависели от материала острия и не менялись от выстрела к выстрелу.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 14-22-00273).

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Месяц, М. И. Яландин, А. Г. Реутова, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, Физика плазмы **38**, 34 (2012).

- **2**. Л. П. Бабич, Т. В. Лойко, В. А. Цукерман, УФН **160**, 49 (1990).
- **3**. Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, И. В. Филюгин, УФН **164**, 263 (1994).
- 4. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, *Лазерные методы* исследования плазмы, Наука, Ленинград (1977).
- 5. Е. В. Паркевич, ПТЭ № 3, 4 (2017).
- S. A. Pikuz, V. M. Romanova, N. V. Baryshnikov, Min Hu, B. R. Kusse, D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer, Rev. Sci. Instr. 72, 1098 (2001).
- 7. S. A. Pikuz, Rev. Sci. Instr. 74, 3192 (2003).
- В. М. Романова, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, А. Е. Тер-Оганесьян, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Физика плазмы 41, 671 (2015).
- С. И. Ткаченко, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. Е. Тер-Оганесьян, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Физика плазмы 35, 798 (2009).