

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОДА НА ПРОБОЙ, ИНИЦИИРОВАННЫЙ ВОЛНОЙ ИОНИЗАЦИИ В РАЗРЯДНОЙ ТРУБКЕ

© 2020 г. А. В. Мещанов^a, Ю. З. Ионих^{a, *}, Ю. С. Акишев^{b, c}

^a Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^b ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Россия

^c Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*e-mail: y.ionikh@spbu.ru

Поступила в редакцию 18.05.2020 г.

После доработки 07.06.2020 г.

Принята к публикации 07.06.2020 г.

Экспериментально исследовано влияние смещения потенциала активного (высоковольтного) электрода на характеристики пробоя в разрядной трубке диаметром 15 мм, наполненной неоном, аргоном или их смесью (3:1) при давлении ~ 1 Торр. Смещение потенциала осуществляется параллельным подключением к электроду дополнительного постоянного напряжения или дополнительных импульсов амплитудой меньше напряжения поддержания самостоятельного разряда. При этом наблюдается изменение напряжения пробоя, скорости предпробойной волны ионизации и яркости излучения из ее фронта. В частности, пробойное напряжение может возрасти до 1.5–2 раз, и такое состояние разрядного промежутка может сохраняться в течение десятков минут. Предполагается, что причиной наблюдаемых эффектов является появление заряда на стенке трубки и изменение ее потенциала вблизи электрода, что влияет на характеристики первичного пробоя между электродом и стенкой и, в свою очередь, на процессы зажигания разряда. Исследуются механизмы возникновения поверхностного заряда стенки при подаче на электрод напряжения смещения.

Ключевые слова: электрический пробой, разрядная трубка, неон, аргон, волна ионизации, заряд стенки, пробойный потенциал, тлеющий разряд

DOI: 10.31857/S0367292120110050

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих газоразрядных устройствах плазма находится в контакте с диэлектрическими поверхностями. Например, тлеющий разряд обычно бывает ограничен диэлектрическими стенками; в барьерном разряде плазма контактирует с диэлектриком, накрывающим электрод (или электроды). На границе, разделяющей плазму и поверхность, могут происходить гетерогенные процессы, влияющие на состав и свойства плазмы — релаксация возбужденных состояний атомов, рекомбинация нейтральных и заряженных частиц, колебательная релаксация и др. В барьерных разрядах с поверхности диэлектрического покрытия происходит эмиссия электронов. С другой стороны, часть электронов и ионов плазмы, попадающих на поверхность, могут оставаться на ней, заряжая ее. Образовавшийся поверхностный заряд может оказывать большое влияние на свойства разряда, в особенности на стадии

пробоя. Процессы, происходящие на диэлектрической поверхности, граничащей с плазмой, были первоначально рассмотрены в теоретических работах [1, 2] для условий положительного столба тлеющего разряда в инертном газе при низком давлении. Модель включала адсорбцию, десорбцию, диффузию и рекомбинацию заряженных частиц на поверхности. В [2] утверждается, что свойства поверхности и процессы на ней могут оказывать заметное влияние на характеристики плазмы. Подход, аналогичный использованным в этих работах, был применен в работе [3], посвященной моделированию барьерного разряда атмосферного давления в азоте в таунсендовском режиме. Показано, что модель приводит к адекватным результатам, если включить в нее десорбцию слабосвязанных электронов с поверхности диэлектрика. Десорбция могла происходить или спонтанно (тепловой механизм), или при взаимодействии с возбужденными молекулами газа. Подход к рассмотрению процессов на поверхно-

сти был аналогичен используемому при рассмотрении адсорбции атомов газа. Считалось, что электроны адсорбируются на активных центрах, поверхностная плотность которых 10^{10} – 10^{11} см $^{-2}$, то есть намного меньше плотности атомов поверхности. Электроны удерживаются на поверхности поляризационными силами с энергией связи порядка 1 эВ. В процессе их диффузии от одного активного центра к другому они могут быть десорбированы или рекомбинировать с ионами, адсорбированными на других активных центрах. Последующие экспериментальные работы подтвердили правильность этой концепции. Так, в работе [4] была установлена корреляция между величиной давления, при которой барьерный разряд переходит из диффузной формы в filamentную, и свойствами диэлектрика накапливать и удерживать поверхностный заряд. Материалом диэлектрика были оксид алюминия Al_2O_3 (алюмооксидная керамика), кварц и фторопласт. В этой и последующих работах [5, 6] было обнаружено, что заряд может сохраняться на поверхности диэлектрика в течение длительного времени после воздействия плазмы — от нескольких минут до нескольких часов. При неравномерном распределении заряда по поверхности может наблюдаться его миграция с характерным временем в несколько секунд [7]. Одним из эффективных механизмов десорбции электронов является фотоэMISSION под действием излучения видимого, УФ- и ИК-диапазонов спектра [4–6, 8]. Поверхностная плотность заряда, типичная для барьерного разряда атмосферного давления, составляет ~ 1 нКл/см 2 [7, 8].

В отличие от барьерного, в тлеющем разряде поверхностный заряд экспериментально практически не изучался. В упоминавшихся выше работах [1, 2] вычисленное значение плотности избыточного отрицательного заряда составляет около 3×10^7 электронов/см 2 , или 2 пКл/см 2 (продольный разряд низкого давления в неоне в трубке радиусом 1 см и токе порядка 10 мА). Эта величина на три порядка меньше типичной для барьерных разрядов, что делает проблематичной ее измерение.

Ситуация меняется, если рассматривать стадию зажигания тлеющего разряда. В разрядной трубке пробой начинается с распространения волны ионизации (ВИ) — области сильного электрического поля, движущейся от высоковольтного электрода к низковольтному. ВИ, в свою очередь, возникает при первичном пробое между высоковольтным электродом и стенкой трубки. Такое описание пробоя было предложено в работе [9]. Прохождение предпробойной ВИ при зажигании тлеющего разряда низкого давления было подтверждено в последующих работах (см. обзор [10] и приведенные в нем ссылки). Как

правило, ВИ регистрируется по ее излучению. Отметим, что здесь речь идет о волнах со скоростью распространения порядка 10^5 – 10^7 см/с, что, в соответствии с классификацией [11], определяется как медленные ВИ. Они возникают при амплитуде пробойного импульса $U_0 \sim 10^3$ В и крутизне фронта $dU/dt \sim 1$ кВ/мкс или меньше. Эти параметры типичны для условий зажигания тлеющего разряда низкого давления. При исследованиях высоковольтных наносекундных разрядов используют импульсы с напряжением в десятки киловольт при $dU/dt \sim 1$ кВ/нс или больше. Возникающие при этом ВИ имеют скорость 10^9 – 10^{10} см/с. Это — быстрые, или высокоскоростные, ВИ, которые здесь не рассматриваются.

При положительной полярности питающего напряжения первичный пробой должен сопровождаться эмиссией электронов с поверхности диэлектрической стенки. В работах [12, 13] было обнаружено, что эта эмиссия может быть многократно ускорена при освещении стенки излучением видимого спектра. Это дает основание утверждать, что, как и в случае барьерного разряда, имеет место десорбция с поверхности слабосвязанных адсорбированных электронов.

При движении ВИ от высоковольтного электрода к заземленному происходит зарядка стенки трубки. Стенка заряжается током, идущим к фронту ВИ через плазменный след, оставленный волной. Плотность поверхностного заряда измерялась в работах [14, 15] в аргоне или в аргоне с парами ртути при давлении около 3 Торр. Эти измерения проводились с помощью емкостного (электростатического) зонда. Полученное значение плотности заряда составляет ≈ 0.2 нКл/см 2 , то есть всего на порядок меньше, чем в барьерном разряде при атмосферном давлении. Другое дело, что она резко падает после зажигания разряда. Может оказаться, однако [15], что ВИ не достигает низковольтного электрода, и разряд не зажигается. В этом случае заряд остается на стенке и при этом следующий в периодической последовательности импульс напряжения не приводит к пробую. В [15] для этой ситуации вводится термин “неудавшийся (*failed*) пробой”. По мнению авторов работ [14, 15], в любом случае наличие на стенке заряда, оставшегося после предыдущего импульса, может создавать неоднозначные начальные условия для пробоя. Для исключения этого в промежутке между импульсами зажигания кратковременный “сбрасывающий” (*resetting*) разряд, который должен снять заряд с поверхности. Авторы [15] предполагают, что, хотя заряд не удаляется полностью, пробой все же становится надежным и воспроизводимым.

В работе [16] процесс зарядки стенки при движении ВИ регистрировался по току высоковольтного электрода; интегрирование этого тока дало

величину заряда стенки. В этой работе изучался пробой в трубке с отсоединенным от цепи питания (незаземленным) низковольтным электродом. В такой схеме пробой всего разрядного промежутка невозможен, и после прохождения ВИ стенка остается заряженной все время, пока на электроде поддерживается высокий потенциал. Разрядка стенки происходит только после окончания импульса напряжения, когда электрод заземляется. При этом снова наблюдается пробой между электродом и стенкой, но с обратным направлением тока (“обратный пробой”). Этот пробой также инициирует ВИ, прохождение которой и снимает заряд со стенки. Обратный пробой происходит не сразу после окончания импульса, а через некоторый случайный промежуток времени (время запаздывания). Если до истечения этого промежутка на электрод снова подать высокое напряжение, то новый первичный пробой не возникает. В [16] это объяснялось тем, что, пока стенка заряжена, ее потенциал остается высоким, и при подаче напряжения на электрод разность потенциалов между ним и стенкой оказывается не достаточной для пробоя. Можно было предположить, что пробой произойдет, если увеличить потенциал электрода. Другими словами, можно было ожидать, что наличие заряда стенки в момент пробоя может привести к увеличению пробойного потенциала.

Это предположение было подтверждено в работе [17]. В ней, в частности, потенциал стенки вблизи высоковольтного электрода перед пробоем увеличивали путем подачи постоянного напряжения u_0 на электрод. Это приводило к тому, что напряжение пробоя U_b возрастало на величину, близкую к u_0 . Появление заряда на стенке связывалось в [17] с конечной проводимостью поверхности стекла и наличием на ней адсорбированных электронов. Это могло повысить потенциал стенки вблизи высоковольтного электрода, возможно, вплоть до величины u_0 . Тогда при подаче на электрод напряжения U разность потенциалов между ним и стенкой было меньше U , и для пробоя требовалось выполнение неравенства $U - u_0 > U_b$. В результате пробойное напряжение увеличится на величину u_0 (или, возможно, меньшую, если потенциал стенки не достигает u_0). Таким образом, кажется возможным направленно и дозировано заряжать диэлектрическую поверхность разрядной трубки и тем самым влиять на характеристики пробоя. В данной работе проведены эксперименты, продолжающие измерения работы [17]. Кроме того, изучалось то, как изменение потенциала смещения высоковольтного электрода (анода или катода) влияет на характеристики предпробойной волны ионизации. Процесс зарядки стенки исследовался в динамике; для этого использовалось им-

пульсное смещение потенциала электрода. Полученные данные позволили скорректировать представление о механизме передачи потенциала от электрода к стенке.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования проводились на установке, аналогичной описанной в работах [16, 17]. Использовались отпаянные стеклянные разрядные трубки с расстоянием между электродами 75–100 см и диаметром 15 мм. Пробой производился импульсами положительной или отрицательной полярности, частота их повторения была низкой, 0.2 Гц. Это было сделано для устранения влияния на пробой возбужденных и заряженных частиц, созданных предыдущим импульсом (“эффект памяти разрядного промежутка” [18, 19]). Импульсы были прямоугольными с длительностью фронта ≈ 1 мкс, либо имели линейно-растущий фронт варьируемой крутизны ($\sim 10^{-1} - 10^2$ кВ/мс). В первом случае изучались характеристики предпробойной волны ионизации. Второй режим позволял измерить напряжение пробоя. Пробой фиксировался по появлению тока в цепи заземленного электрода и скачкообразному спаду анодного напряжения. Величина напряжения непосредственно перед скачком принималась равной напряжению пробоя. Ток разряда, возникавшего после пробоя, ограничивался балластным сопротивлением на уровне ~ 10 мА. Волна ионизации регистрировалась по ее излучению с помощью системы, состоящей из двух оптоволоконных световодов, фотоумножителей и осциллографа. Осциллограф фиксировал два пика, из величины интервала между ними находилась скорость ВИ, усредненная по расстоянию между световодами. Исследуемыми газами были неон, аргон и их смесь в соотношении 3:1.

Измерения проводились с включенным внешним освещением лаборатории. Освещение уменьшало статистическое время запаздывания пробоя и приводило к стабилизации напряжения пробоя, которое без освещения могло флуктуировать в очень широких пределах [13].

Для исследования влияния заряда и потенциала стенки на один из электродов трубки дополнительно подавалось постоянное или импульсное, положительное или отрицательное напряжение смещения амплитудой, меньшей необходимого для поддержания самостоятельного разряда.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Смещение потенциалом, не зависящим от времени

В этом случае на высоковольтный электрод (ВВЭ), параллельно с импульсом напряжения

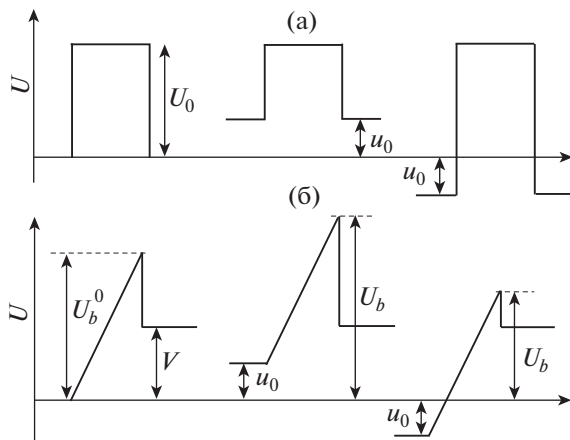


Рис. 1. Форма импульсов напряжения на ВВЭ в отсутствие и при наличии постоянного потенциала смещения u_0 . V — падение напряжения на установившемся разряде. Приведен случай положительных импульсов — прямоугольных (а) и с линейно-растущим фронтом (б).

пробоя, подавалось постоянное напряжение смещения u_0 (рис. 1). Значение u_0 ограничивалось величиной напряжения поддержания установившегося разряда.

3.1.1. Влияние смещения на предпробойную волну ионизации. В этом случае импульсы напряжения пробоя были прямоугольными с амплитудой U_0 , причем смещение потенциала ВВЭ не меняло этой величины (рис. 1а). Смещение влияло на скорость ВИ и на интенсивность излучения из ее фронта. На рис. 2 представлены зависимости скорости предпробойной ВИ в неоне и аргоне от амплитуды U_0 со смещением и без него. Видно, что при заданном U_0 смещение уменьшает скорость волны, если его знак совпадает с полярностью

импульса, и увеличивает в противоположном случае.

На рис. 3 приведены осциллограммы яркости излучения линии иона Ar^+ в предпробойной волне ионизации в аргоне при подаче на ВВЭ положительного или отрицательного импульса напряжения амплитудой $|U_0| = 2$ кВ. Кривые с наибольшей интенсивностью получены без дополнительного напряжения смещения, остальные, по мере ее уменьшения — со смещением $|u_0| = 100, 400$ и 700 В. Полярность U_0 и u_0 одна и та же. Видно, что смещение заметно, до 2–2.5 раза, уменьшает интенсивность излучения волны.

3.1.2. Влияние смещения на напряжение пробоя.

В этом случае использовались импульсы положительной полярности с линейно растущим фронтом (рис. 1б). На представленных ниже графиках крутизна фронта $dU/dt \approx 1$ кВ/мс, если это не оговорено иначе в подписи к рисунку. В работе [17] было обнаружено, что смещение потенциала высоковольтного анода на постоянную положительную величину u_0 увеличивает динамическое напряжение пробоя U_b на значение, достигающее u_0 . Рис. 4, построенный по результатам настоящей работы, подтверждает правильность этого вывода. Измерения проведены в аргоне при давлении 1 Торр для трех разных скоростей роста анодного напряжения dU/dt . Каждая из точек получена усреднением по 50 импульсам. С увеличением dU/dt пробойное напряжение растет, что обусловлено наличием времени запаздывания пробоя [17]. Прямые линии на этом рисунке описываются соотношением

$$U_b = U_b^0 + u_0, \quad (1)$$

где U_b^0 — напряжение пробоя без смещения. Видно, что экспериментальные точки хорошо укла-

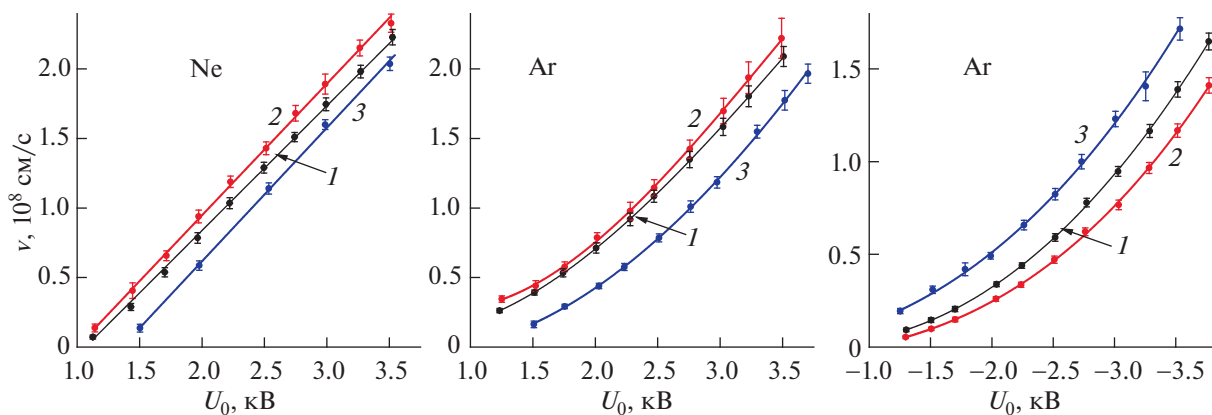


Рис. 2. Зависимость скорости волны ионизации от амплитуды импульса напряжения при различных смещающих потенциалах u_0 высоковольтного электрода. $u_0 = 0 - 1, -600 \text{ В} - 2, +600 \text{ В} - 3$; давление 0.6 Торр (Ne), 1 Торр (Ar).

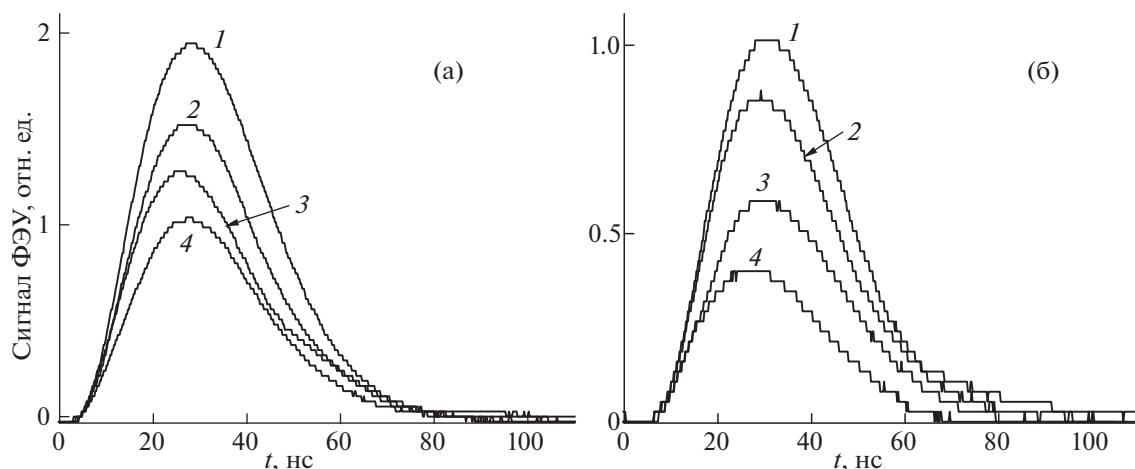


Рис. 3. Яркость излучения линии иона Ag^+ λ 487.98 нм из фронта волны ионизации при положительной (а) и отрицательной (б) полярности импульса напряжения и при различных смещающих потенциалах u_0 высоковольтного электрода. $|u_0| = 0 - 1, 100 \text{ В} - 2, 400 \text{ В} - 3$ и $700 \text{ В} - 4$. Полярность смещения совпадает с полярностью импульса. Давление 1 Торр.

дываются на них. В [17] аналогичные результаты получены для неона и смеси $\text{Ne}-\text{Ar}$.

При отрицательном смещении картина может быть более сложной. На рис. 5 приведены результаты таких измерений для неона. Нижняя прямая на этом графике описывается уравнением (1), а верхняя — формулой

$$U_b = 2U_b^0 + u_0, \quad (2)$$

где $u_0 < 0$. Видно, что при $|u_0| \leq 100 \text{ В}$ экспериментальные точки лежат на первой прямой, а при $|u_0| \geq 300 \text{ В}$ — на второй. В промежутке $|u_0| = 150 -$

250 В величина U_b скачком удваивается. Рис. 6 дает возможность понять, что происходит при пробоях с удвоенным напряжением (для $|u_0| = 500 \text{ В}$). На рисунке приведены осциллограммы яркости излучения ВИ, анодного напряжения и разрядного тока. ВИ регистрируется в точках на расстоянии 3 и 24 см от анода. Когда приложенное напряжение достигает, по отношению к потенциалу смещения, “нормального” пробойного значения $\sim 1 \text{ кВ}$, появляется ВИ (сигналы 1 и 2 на осциллограмме яркости). Излучение из фронта этой волны намного слабее, а ее скорость ($4 \times 10^5 \text{ см/с}$) на порядок меньше, чем для волны, которая обычно

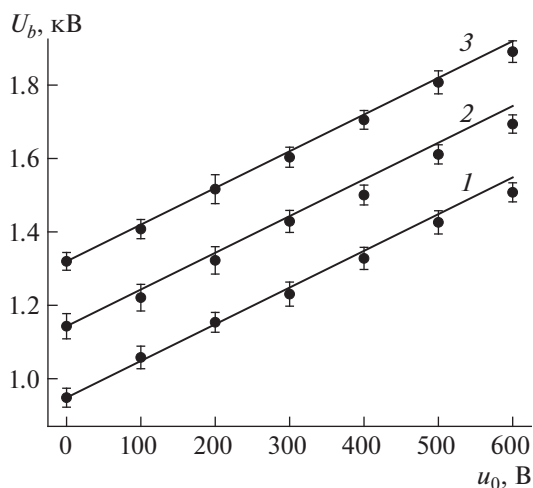


Рис. 4. Зависимость напряжения пробоя от потенциала смещения анода при различной скорости роста анодного напряжения. $dU/dt = 5.1 \text{ кВ/мс} - 1, 19.6 \text{ кВ/мс} - 2$ и $47.5 \text{ кВ/мс} - 3$. Прямые — расчет по формуле (1). Аргон, 1 Торр.

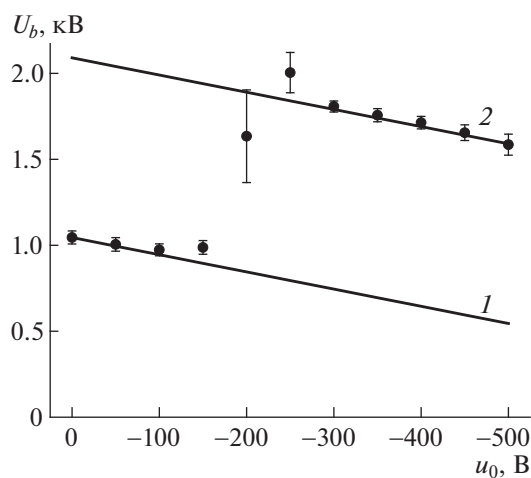


Рис. 5. Зависимость напряжения пробоя от потенциала смещения анода. Линия 1 — расчет по формуле (1), линия 2 — по формуле (2). Неон, 0.6 Торр.

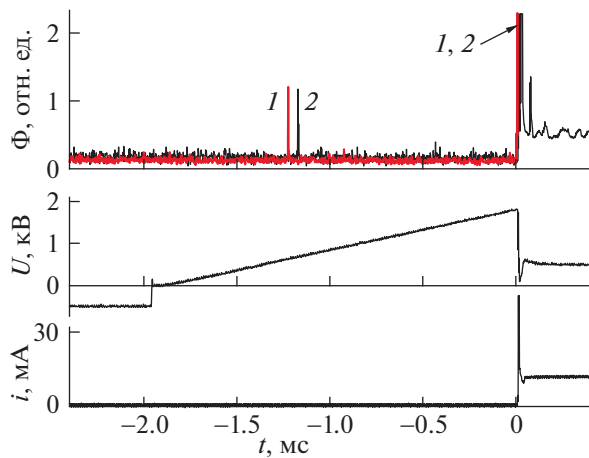


Рис. 6. Осциллограммы интегрального излучения волны ионизации, анодного напряжения и разрядного тока при пробое со смещением потенциала анода на $u_0 = -500$ В. Неон, 0.6 Торр. 1 – сигнал из точки в 3-х см от анода, 2 – в 24 см.

наблюдается перед пробоем. Как следует из вида осциллограмм напряжения и тока, в этом случае пробой не происходит, и напряжение продолжает расти. Пробой наступает только при удвоенном значении напряжения, ≈ 2 кВ. Предпробойная ВИ при этом значительно ярче, а скорость настолько велика, что при временной развертке осциллограммы рис. 6 сигналы с двух ФЭУ (1, 2) не разрешаются.

3.2. Смещение импульсным напряжением

В этом случае импульсы смещения имели прямоугольную форму с амплитудой u_0 . При исследовании влияния этих импульсов на потенциал пробоя U_b выяснилось, что такое влияние имеет место только если импульс смещения начинается после окончания разрядного импульса. Естественно, речь в таком случае может идти только о влиянии на пробой в следующем из последовательности разрядных импульсов. Осциллограммы напряжения в основном импульсе и в импульсе смещения, а также разрядного тока приведены для этого случая на рис. 7. Импульс смещения амплитудой $u_0 = 400$ В и длительностью 10 мс задержан относительно заднего фронта основного импульса на величину Δt .

На рис. 8 представлены графики зависимости $U_b(u_0)$ для неона, аргона и их смеси при двух давлениях. Во всех случаях $\Delta t = 1$ мс, кроме зависимости 2 рис. 8а, где $\Delta t = 50$ мкс. Видно, что соотношение (1), хотя и с разной точностью, но выполняется.

На самом деле, как уже отмечалось, речь может идти только о влиянии на следующий в пери-

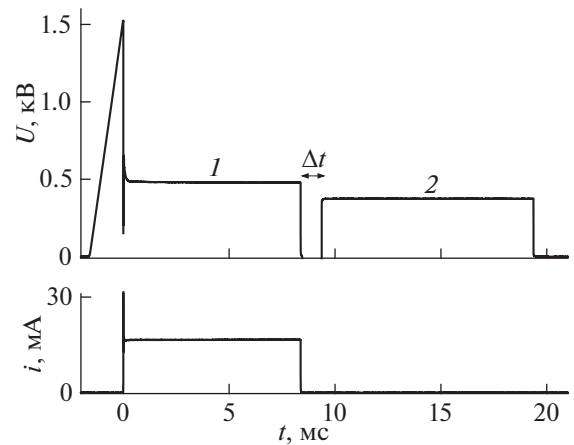


Рис. 7. Осциллограммы импульса напряжения и тока при пробое. 1 – разрядный импульс, 2 – импульс смещения.

одической последовательности импульс, проходящий через интервал 5 с (период повторения импульсов). Подтверждением того, что импульс смещения может оказывать влияние на напряжение пробоя через такое и даже более длительное время, служит рис. 9. Здесь импульс смещения амплитудой $u_0 = +500$ В был подан через $\Delta t = 2$ мс после разрядного импульса. Промежуток до следующего импульса (период повторения) менялся в широких пределах – от 5 с до 60 мин. Видно, что как для положительной, так и для отрицательной полярности напряжения заметное превышение U_b над U_b^0 (горизонтальная прямая) сохраняется более 1 часа, а в течение первых 5 мин величина эффекта почти не меняется. Правая ось на этих рисунках дает для тех же кривых оценку соответствующего поверхностного заряда стенки. Эта величина найдена в предположении однородности заряда и исходя из значения емкости трубки, полученного ниже (п. 4.2).

С другой стороны, оказалось, что по отношению к длительности задержки импульса Δt эффект весьма критичен. Рисунок 10 показывает, что его величина начинает резко падать через 2–7 мс, а после 6–12 мс он полностью исчезает. При повышении давления эти границы сдвигаются в сторону больших значений.

Зависимость величины эффекта еще от одного параметра импульса смещения – его длительности τ – иллюстрируется рис. 11 и 12. На рис. 11 зависимость $U_b(\Delta t)$ изображена для различных значений τ , от 1 мс до 1 с. Видно, что в этом диапазоне влияние τ практически незаметно. Но при дальнейшем уменьшении этой величины (рис. 12) эффект ослабевает, хотя остается заметным вплоть до $\tau = 2$ мкс.

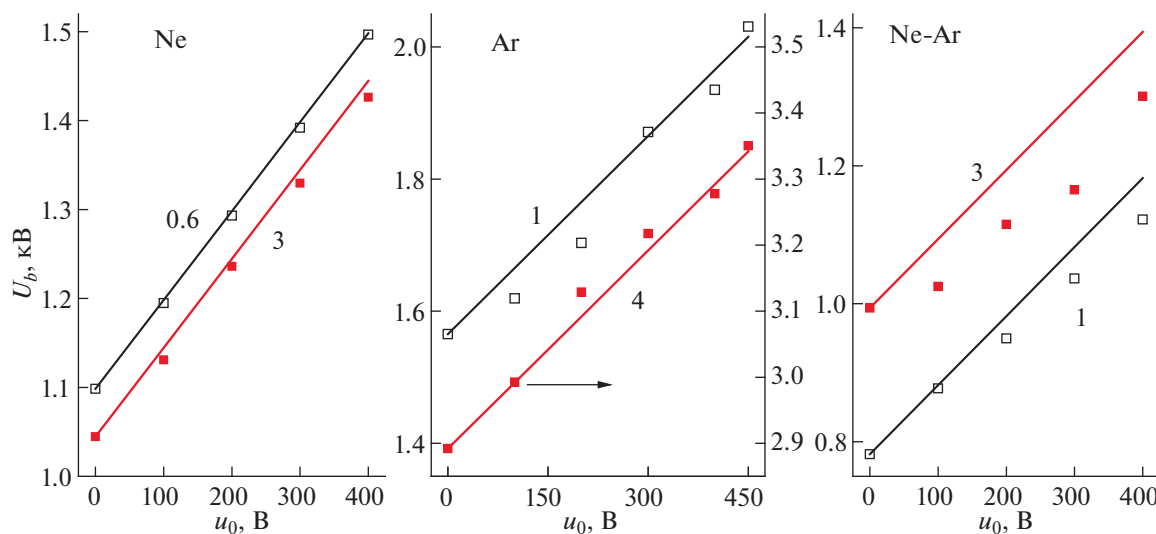


Рис. 8. Зависимость напряжения пробоя от амплитуды импульса смещения в неоне, аргоне и их смеси (3 : 1) для разных давлений (указаны цифрами в единицах Торр). Длительность импульса смещения 10 мс, задержка относительно разрядного импульса 1 мс. Крутизна роста напряжения $dU/dt = 1$ кВ/мс (Ne и Ne-Ar) и 0.05 кВ/мс (Ar). Прямые – расчет по формуле (1).

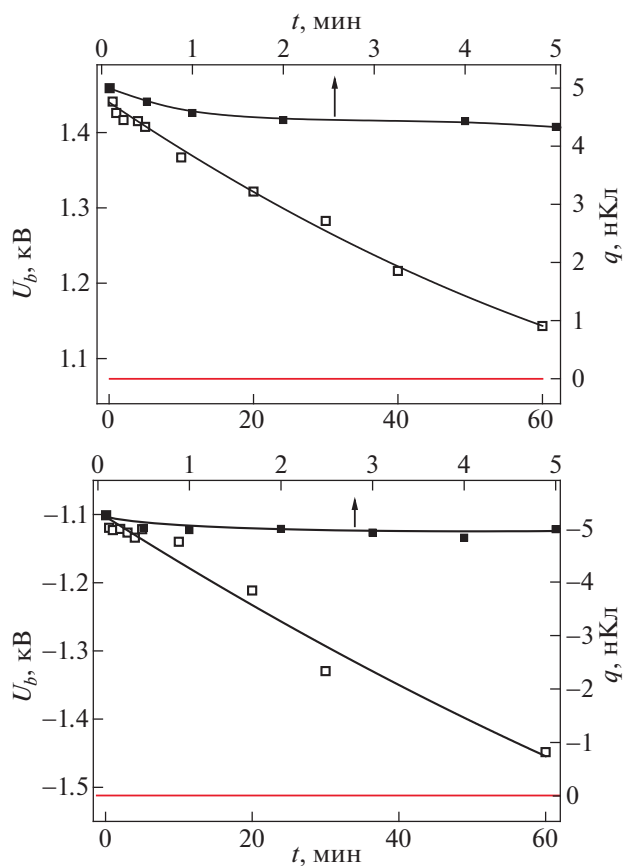


Рис. 9. Изменение напряжения пробоя во времени (в двух временных масштабах) после смещения потенциала анода (а) или катода (б) импульсом амплитудой $u_0 = +500$ В и длительностью 10 мс, задержанного относительно разрядного импульса на $\Delta t = 2$ мс. Неон, 0.6 Торр. Горизонтальная линия – напряжение пробоя при $u_0 = 0$. Правая ось – оценка величина поверхностного заряда стенки.

На переднем фронте импульса смещения возникало свечение газа. Наблюдаемая картина зависела от задержки импульса. При $\Delta t \sim 100$ мкс излучал весь объем трубки. При больших значениях Δt картина менялась. Для интервала Δt , в котором наблюдалось влияние смещения на напряжение пробоя (рис. 10), на переднем фронте импульса появлялось излучение волны ионизации. На рис. 13 приведены осциллограммы яркости излучения в неоне из разных точек вдоль трубки при задержке $\Delta t = 2$ мс, амплитуде импульса $u_0 = 400$ В и его длительности 100 мкс. Первый пик с острым максимумом отвечает излучению первичного пробоя, остальные – свечению фронта ВИ. С удалением от анода оно затухает, одновременно падает скорость движения волны (рис. 14). Для условий рис. 13 ВИ исчезает при $x \approx 55$ см. При изменении амплитуды импульса смещения u_0 наибольшее расстояние от анода, на котором регистрировалась ВИ, менялось (рис. 15).

На переднем фронте импульса смещения регистрировался также ток. Анодный ток монотонно уменьшался с ростом Δt (рис. 16) и выходил на насыщение при $\Delta t > 3$ мс. Катодный ток при минимальных задержках был примерно такой же по форме и величине, как анодный, а при увеличении Δt падал и, начиная с $\Delta t = 0.75$ мс, не регистрировался. Отсюда следует, что при этом анодный ток заряжал стенку. Величину этого заряда можно получить его интегрированием по времени. Полученные значения растут с увеличением амплитуды импульса смещения u_0 (рис. 15) и уменьшаются с ростом Δt с выходом на насыщение при $\Delta t \approx 4$ мс (рис. 17).

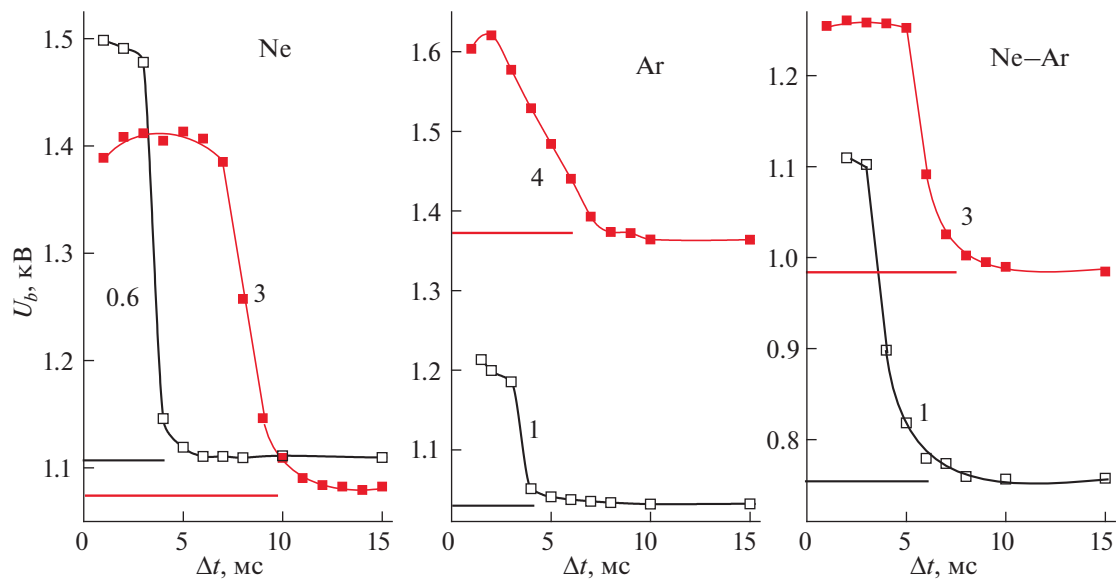


Рис. 10. Зависимость напряжения пробоя от задержки импульса смещения относительно разрядного импульса в неоне, аргоне и их смеси (3:1) для разных давлений (указаны цифрами в единицах Торр). Длительность импульса 10 мс, амплитуда 400 В. Горизонтальные линии — напряжение пробоя в отсутствии смещения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Потенциал смещения, не зависящий от времени

Данные, представленные на рис. 2–4, могут быть интерпретированы аналогично тому, как это делалось в работе [17]. Постоянный потенциал u_0 , приложенный к ВВЭ, смещает потенциал

стенки трубки, по крайней мере, ее участка вблизи электрода. Для фиксированного пробивающего напряжения U , то есть для прямоугольного импульса амплитудой $U_0 > U_b^0$, где U_b^0 — напряжение пробоя в отсутствии смещающего потенциала, это приводит к изменению разности потенциалов между электродом и стенкой. При одинаковой полярности U_0 и u_0 абсолютная величина этой

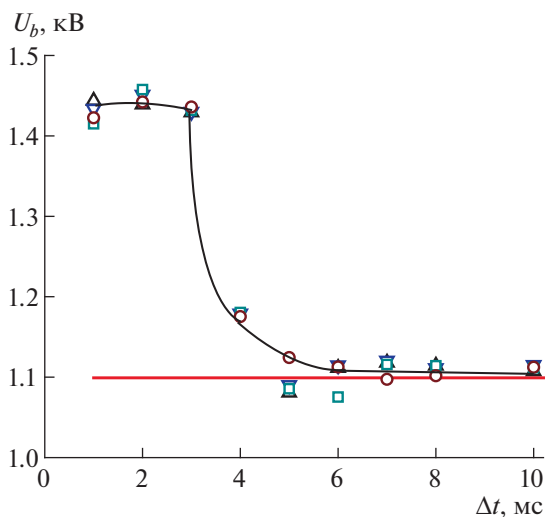


Рис. 11. Зависимость напряжения пробоя от задержки импульса смещения относительно разрядного импульса для разной длительности τ импульса. Точки разной конфигурации отвечают $\tau = 1, 10, 100$ и 1000 мс. Амплитуда импульса 500 В. Горизонтальная линия — напряжение пробоя в отсутствии смещения. Неон, 0,6 Торр.

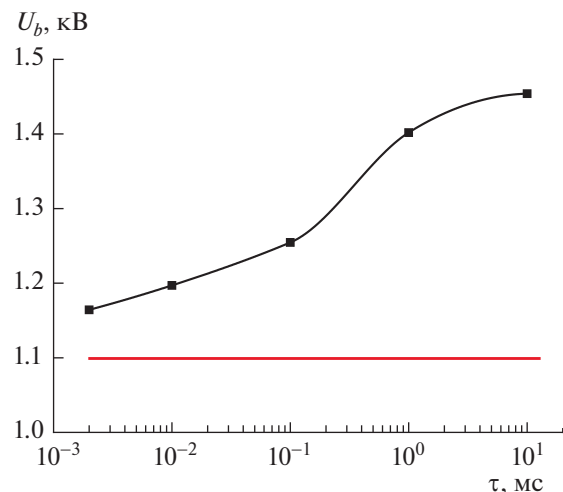


Рис. 12. Зависимость напряжения пробоя от длительности импульса смещения. Амплитуда импульса 400 В, задержка относительно разрядного импульса 2 мс. Горизонтальная линия — напряжение пробоя в отсутствии смещения. Неон, 0,6 Торр.

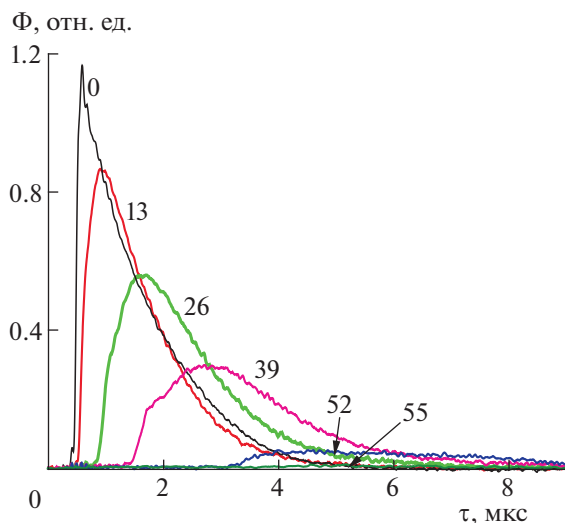


Рис. 13. Осциллограммы яркости излучения волны ионизации на фронте импульса смещения, записанные из точек на разном расстоянии от анода (указано цифрами в сантиметрах). Амплитуда импульса 400 В, длительность 10 мс, задержка относительно разряда 2 мс. Неон, 0,6 Торр.

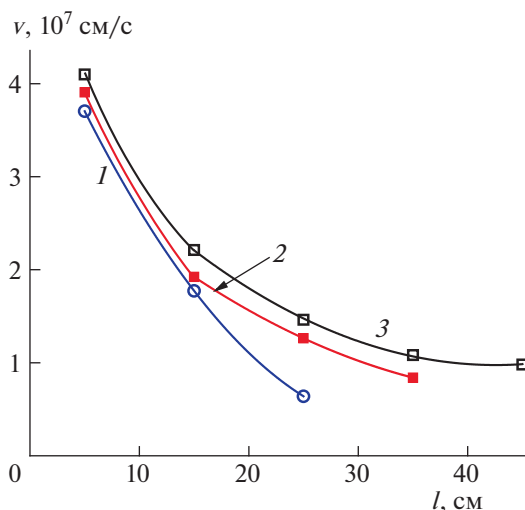


Рис. 14. Скорость волны ионизации на фронте импульса смещения как функция расстояния от анода. Длительность импульса 10 мс, задержка относительно разряда 2 мс, амплитуда 200 В — 1, 300 В — 2 и 400 В — 3. Неон, 0,6 Торр.

разности уменьшается, при противоположной — увеличивается. Это эквивалентно соответственно уменьшению или увеличению амплитуды импульса при отсутствии смещения, что и должно привести к тому, что в первом случае скорость распространения предпробойной ВИ и интенсивность излучения ее фронта падают, во втором — растут (рис. 2, 3).

Для импульса с линейно растущим фронтом величина U не фиксирована и пробой происходит, когда разность потенциалов между ВВЭ и стенкой превышает напряжение U_b^0 . В этом случае смещение потенциала стенки должно привести к соответствующему изменению напряжения пробоя U_b . В случае, изображенном на рис. 4, когда U и u_0 положительны, величина U_b увеличивается на u_0 (формула (1)). Более сложный случай иллюстрируется рис. 5, где при положительном U смещение u_0 отрицательно. При $|u_0| < 150$ В напряжение пробоя уменьшается в соответствии с формулой (1), а затем скачком увеличивается почти вдвое, после чего опять падает с тем же наклоном. Осциллограммы рис. 6 показывают, что при $U \approx U^* \equiv U_b^0 - |u_0|$ генерируется волна ионизации. Она, однако, имеет аномально низкие интенсивность излучения и скорость движения и не приводит к пробую. Это возможно, если она затухает, не достигнув катода, либо если плазма в оставленном ею следе имеет плотность, недостаточную для развития дальнейших процессов пробоя. Такое аномальное поведение ВИ может быть

связано с тем, что стенка приобретает потенциал, близкий к u_0 , вблизи анода, а при удалении от него его абсолютная величина уменьшается. В этом случае разность потенциалов между электродом и стенкой достаточна для первичного пробоя и генерации волны, но не достаточна для поддержания ее нормального распространения. В то же время эта волна заряжает стенку вблизи анода до потенциала, близкого к U^* . И теперь для генерации новой ВИ требуется напряжение $U_b^0 + U^* \approx 2U_b^0 - |u_0|$. Эта волна имеет уже нормальные характеристики (скорость и интенсивность излучения) и приводит к полноценному пробую. Наблюдаемая здесь картина сходна с упоминавшимся выше “неудавшимся” пробоем [15], но там пробойный импульс был прямоугольным, и поэтому второй, главной, волны не возникало.

4.2. Смещение прямоугольным импульсом

Исследования с импульсным смещением позволяют пересмотреть предположение [17] о механизмах зарядки поверхности стенки трубки. Если смещающий импульс задержан относительно разрядного (рис. 7), то на его переднем фронте происходит первичный пробой, инициирующий волну ионизации. Поскольку амплитуда импульса смещения u_0 меньше величины U_b , эта волна движется с быстро уменьшающимися яркостью излучения и скоростью (рис. 13, 14) и затухает, не достигнув низковольтного электрода, а потому не приводит к полному пробую промежутка. Как только что упоминалось, аналогичная картина —

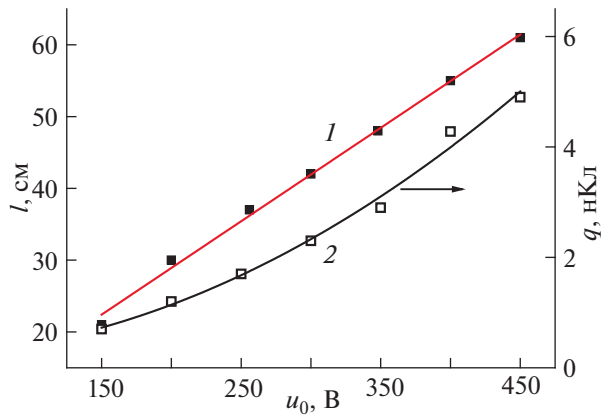


Рис. 15. Зависимость длины области проникновения волны ионизации — 1 и заряда, оставленной волной — 2, от амплитуды импульса смещения. Длительность импульса 10 мс, задержка относительно разряда 2 мс. Неон, 0.6 Торр.

“неудавшийся” пробой — наблюдалась в работе [15], когда на ВВЭ подавался импульс амплитудой меньше пробойного напряжения. Но при этом волна заряжает стенку до потенциала, близкого к потенциалу электрода, то есть u_0 . Таким образом, именно ВИ оставляет на стенке заряд, влияющий затем на пробойное напряжение. Величина этого заряда равна

$$q = Cu_0, \quad (3)$$

где C — емкость заряженного участка трубки, определяемого длиной области проникновения волны l . Комбинируя зависимости $q(u_0)$ и $l(u_0)$, приведенные на рис. 15, можно получить связь между C и l (рис. 18). При увеличении u_0 длина l и, соответственно, емкость C растут, поэтому заряд q зависит от u_0 быстрее, чем линейно (рис. 15). Отсюда следует, что увеличение потенциала смещения приводит к росту также и поверхностной плотности заряда (этот рост близок к пропорциональному). При этом линейная зависимость C от l свидетельствует об однородности поверхностного заряда. Отличное от нуля значение емкости, полученное экстраполяцией к $l = 0$ и равное 1.0 ± 0.7 пФ, можно связать с емкостью электрода. Это совпадает как с теоретической оценкой (эффективный размер электрода ~ 1 см), так и с экспериментальной, полученной при регистрации импульса тока через отрезанный от трубки электрод (1.4 пФ). Аналогичным образом можно объяснить наличие постоянной составляющей у зависимости $q(\Delta t)$ (рис. 17). Экстраполяция зависимости $C(l)$ к $l = 80$ см (полная длина трубки) дает $C = 14$ пФ, что близко к оценке емкости трубки исходя из геометрии ее и ее окружения (16 пФ).

Излучение фронта ВИ регистрировалось в области задержек Δt , для которой наблюдалось вли-

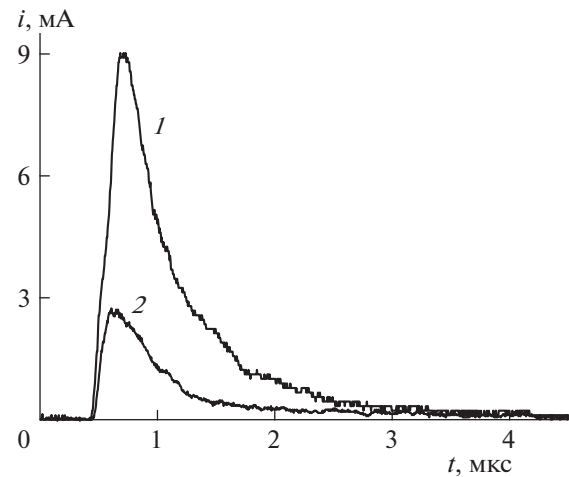


Рис. 16. Осциллограммы анодного тока на фронте импульса смещения. Задержка импульса относительно разряда 1 мс — 1 и 3 мс — 2, амплитуда 400 В, длительность 10 мс. Неон, 0.6 Торр.

яние смещения потенциала на пробойное напряжение (рис. 10). При больших задержках (для условий рис. 13, 14 — это $\Delta t > 3$ мс) волна не возбуждалась. Более того, при этом отсутствовал и пик яркости, отвечающий первичному пробую между анодом и стенкой. Это можно объяснить тем, что, поскольку $u_0 < U_b$, для пробоя необходимо наличие остаточной ионизации. Оценить концентрацию электронов в фазе послесвечения в данных условиях достаточно сложно из-за большой роли процессов ассоциативной ионизации с участием метастабильных атомов, концентрация которых в этих условиях относительно велика

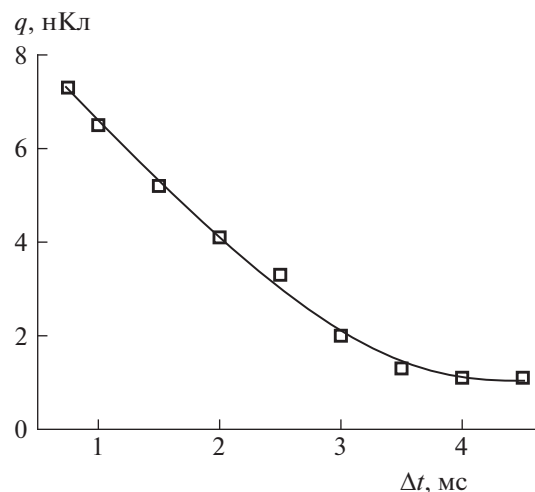


Рис. 17. Зависимость заряда, оставленного волной ионизации, от задержки импульса смещения. Амплитуда импульса 400 В, длительность 10 мс. Неон, 0.6 Торр.

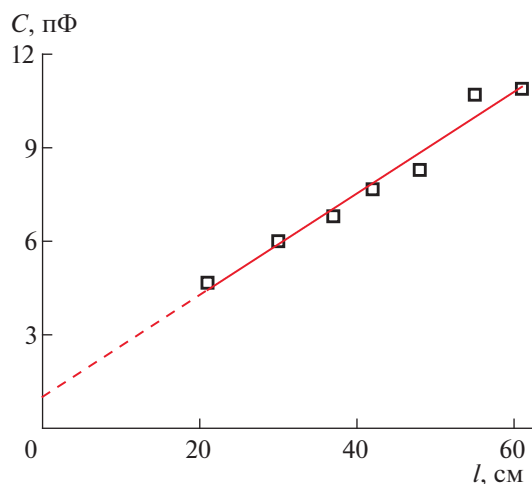


Рис. 18. Зависимость емкости трубки от длины области проникновения волны ионизации.

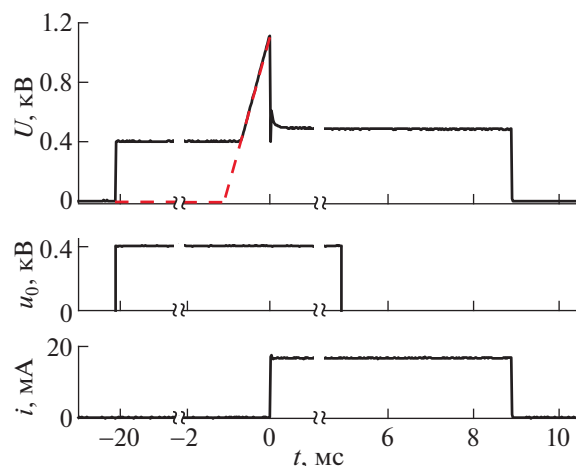


Рис. 19. Осциллограммы анодного напряжения, потенциала смещения и разрядного тока в ситуации отсутствия влияния смещения на пробой.

[13], что, в свою очередь, приводит к существенно нелокальному виду функции распределения электронов по энергиям [20]. Можно лишь, исходя из полученных результатов, предположить, что в момент $t = 3$ мс концентрация заряженных частиц еще достаточна для пробоя, а при $t = 4$ мс — уже нет. В любом случае кажется очевидным, что увеличение давления должно привести к замедлению ухода электронов из объема и, соответственно, к удлинению промежутка Δt , в котором наблюдается эффект. Это действительно наблюдается в эксперименте (рис. 10). Здесь следует заметить, что в работе [15] “неудавшийся” пробой наблюдался при частоте повторения импульсов 5 Гц, то есть ВИ возбуждалась импульсом с амплитудой ниже пробойного при намного большем значении Δt , а именно 200 мс. Однако в этих экспериментах перед включением импульса пробоя производилась предионизация приэлектродной области вспомогательным разрядным импульсом.

Таким образом, появление заряда на стенке при подаче на электрод импульсного смещения, запаздывающего относительно разрядного импульса, можно объяснить генерацией волны ионизации на фронте смещающего импульса. Подтверждением этого является результат эксперимента, в котором смещающий импульс начинается раньше зажигания разряда и заканчивается до окончания разрядного импульса. В этом случае (рис. 19) импульс смещения начинался за 20 мс до пробоя и оканчивался за 4 мс до обрыва разряда. Штрихами на этом рисунке изображен аналогичный импульс напряжения без смещения. Видно, что пробойный потенциал (напряжение в точке обрыва линейного роста) в обоих случаях один и тот же. Усреднение по 50 импульсам

дает $U_b = 1122 \pm 6$ В для импульса без смещения и 1137 ± 8 В со смещением. Очевидно, что при пробое здесь также создается ВИ, заряжающая стенку. Однако зажигающийся после этого разряд “стирает” этот заряд, оставляя после себя незаряженную стенку, и изменение пробойного потенциала не происходит.

Имеется, однако, некоторое обстоятельство, которое требует дополнительного рассмотрения. Время пробега ВИ через трубку составляет несколько микросекунд (рис. 13). Если бы зарядка стенки была обусловлена только прохождением волны, то влияние импульса смещения проявилось бы полностью при его длительности $\tau \approx 10$ мкс и дальнейшее его удлинение не играло бы роли. На самом деле, как видно из рис. 12, это влияние усиливается вплоть до $\tau \sim 1$ мс. Следовательно, смещающее поле в условиях существования остаточной плазмы само по себе воздействует на потенциал стенки. Этот факт подтверждается следующим экспериментом. После обрыва разряда и после задержанного относительно него импульса смещения, к аноду, через некоторую паузу, прикладывался еще один смещающий импульс варьируемой длительности. На рис. 20 приведен пример осциллограмм, когда первый смещающий импульс длительностью 100 мкс приложен через 1 мс после обрыва разряда, а второй, длительностью 2 мс, еще через 1 мс. Второй импульс, в отличие от первого, производил на своем фронте лишь слабое свечение вблизи анода, но не возбуждал волну ионизации, а анодный ток в нем не превышал тока заряда паразитной емкости. Очевидно, это связано с тем, что стенка была уже заряжена волной ионизации первого импульса до потенциала, равного потенциалу второго. Тем не менее, второй импульс заметно

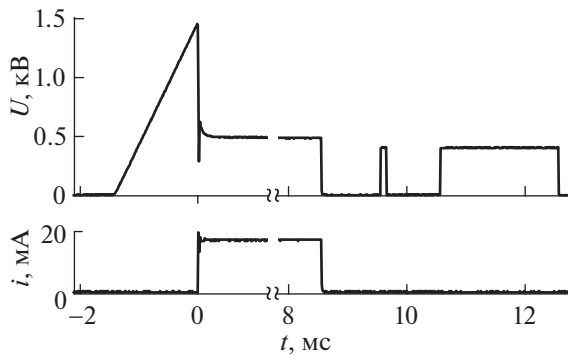


Рис. 20. Осциллограммы анодного напряжения и разрядного тока при двух смещающих импульсах.

увеличивал пробойное напряжение, и тем сильнее, чем длиннее он был. На рис. 21а нижняя линия отмечает напряжение пробоя без импульсов смещения, а верхняя — при наличии только первого импульса. Видно, что эффект от второго импульса насыщается при его длительности ≈ 1 мс, и в этом случае он удваивает эффект от первого. Рис. 21б показывает, как его действие зависит от задержки относительно первого импульса. Видно, что оно прекращается через опять те же 3 мс.

В свете рассмотренного имеет смысл вернуться к обсуждению механизма зарядки стенки смещением, не зависящим от времени. В работе [17] было высказано предположение, что смещение потенциала электрода приводит к изменению потенциала стенки благодаря ее поверхностной или объемной проводимости. Это предположение, однако, опровергается результатами следующего

эксперимента (рис. 22). Наблюдалась серия пробоев с периодом повторения ~ 1 мин, первый из которых производился после длительной, более 40 час, паузы. До начала измерений на ВВЭ подавалось положительное смещение. Оно вызывало ожидаемое изменение пробойного напряжения (увеличение в случае положительной полярности напряжения и уменьшение — отрицательного), но только начиная со второго импульса. На первый импульс смещение потенциала не оказывало воздействия. Таким образом, изменение потенциала стенки происходит только при совокупном действии потенциала смещения электрода и предыдущего разрядного импульса. Можно предложить следующий сценарий происходящего. Смещение, поданное до первого пробивающего импульса, на самом деле не вызывает изменения потенциала стенки, поэтому пробойное напряжение для этого импульса равно U_b^0 . В момент пробоя генерируется ВИ, которая заряжает стенку до потенциала, приблизительно равного U_b^0 . Затем зажигается разряд, который “стирает” заряд волны; в разряде потенциал стенки “следит” за потенциалом плазмы (с точностью до радиального падения потенциала, небольшого по сравнению с продольным). Если смещение отсутствует, то в момент окончания разрядного импульса анод заземляется, продольный градиент потенциала исчезает, и после распада плазмы потенциал стенки во всех точках становится равным потенциалу земли. Если же к аноду приложено постоянное смещение u_0 , то после обрыва разряда возникает ситуация, аналогичная рассмотренной выше, когда остаточная плазма находится в поле, создан-

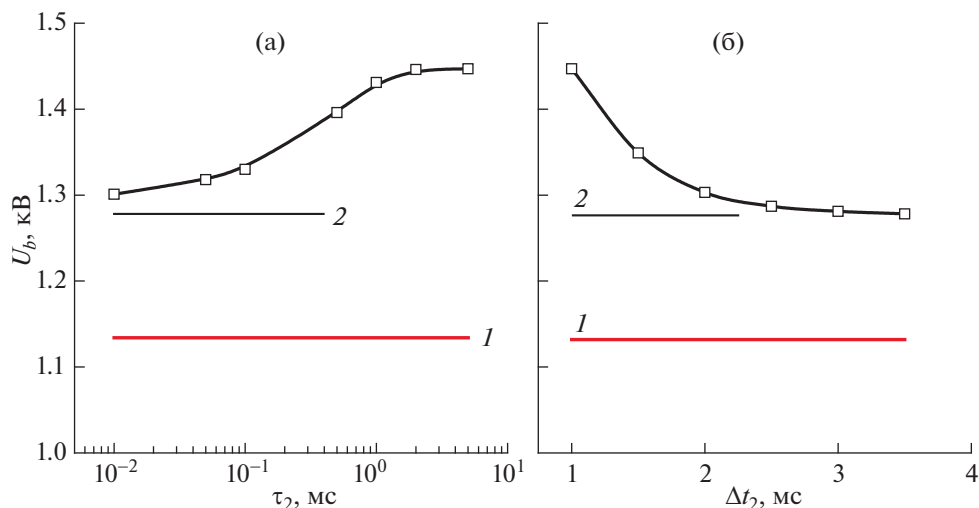


Рис. 21. Зависимость напряжения пробоя от длительности второго импульса смещения (а) и его задержки относительно разряда (б). Линия 1 — напряжение пробоя без импульсов смещения, линия 2 — только с первым импульсом длительностью 100 мкс. Амплитуда импульсов 400 В, задержка первого импульса относительно разряда 1 мс. Задержка второго импульса 2 мс (а), его длительность — 10 мс (б). Неон, 0,6 Торр.

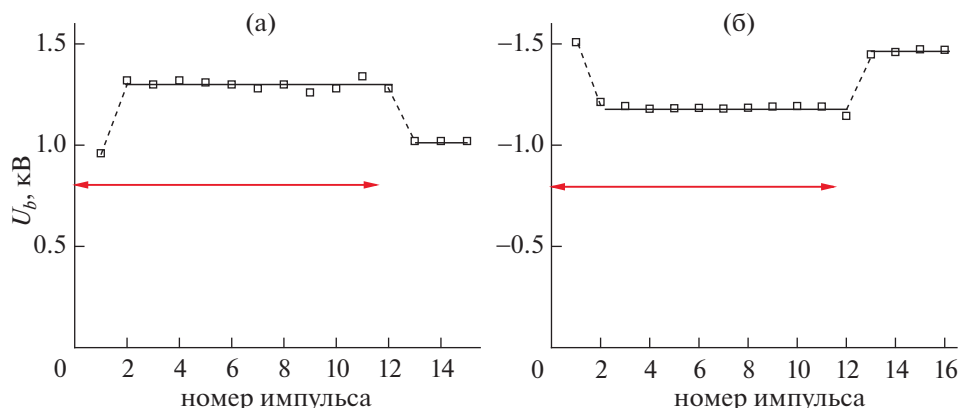


Рис. 22. Напряжение пробоя, полученное для серии импульсов после длительной паузы. Отмечен промежуток, в котором на ВВЭ подавался постоянный потенциал смещения $u_0 = +390$ В (а) или $+500$ В (б). Частота повторения импульсов ~ 1 мин. Неон, 0.6 Торр.

ном напряжением смещения, и после распада плазмы стенка оказывается заряженной. Механизм “запоминания” стенкой потенциала смещения после распада плазмы не ясен. Можно предположить, что, по мере уменьшения концентрации электронов, ослабляется экранирующее действие плазмы, и в конце ее распада вблизи ВВЭ образуется объемный заряд, который в итоге заряжает стенку. Моделирование этого процесса является отдельной задачей.

Также пока остается открытым вопрос о природе разрядки поверхности, приводящей к постепенному ослаблению влияния смещения потенциала ВВЭ. Из полученных данных (рис. 9) следует, что этот процесс достаточно медленный, его характерное время $\sim 10^3$ с. Это сопоставимо с временем распада заряда, полученным в работах [5, 6]. Соответствующий ток разряда имеет порядок 10^{-11} А, а сопротивление утечки — $10^{13}–10^{14}$ Ом. Такие параметры могут соответствовать проводимости стекла — поверхностной или объемной, а также проводимости атмосферного воздуха. Безотносительно к механизму исчезновения поверхностного заряда, достаточно большое время его существования позволяет использовать его влияние на пробойное напряжение фактически в режиме разовых импульсов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовано влияние постоянного или импульсного смещения потенциала высоковольтного электрода (ВВЭ) на характеристики пробоя в разрядной трубке диаметром 15 мм, наполненной неоном, аргоном или их смесью (3 : 1) при давлении ~ 1 Торр. Пробой производился высоковольтными импульсами прямоугольной формы или импульсами с линейно растущим фронтом и с периодом повторения

5 с. В первом случае изучалось влияние смещения на параметры предпробойной волны ионизации (ВИ), во втором — на напряжение пробоя. Величина смещения варьировалась, но была ограничена сверху потенциалом поддержания самостоятельного разряда.

Смещение потенциала ВВЭ на постоянный уровень приводит к изменению скорости ВИ и яркости излучения из ее фронта. И та, и другая величина уменьшается, если полярность смещения и пробойного импульса совпадают, и увеличивается в обратном случае. Такое поведение ВИ можно объяснить тем, что смещение потенциала ВВЭ вызывает изменение потенциала стенки вблизи него. Поскольку первичный пробой, при котором генерируется ВИ, происходит между ВВЭ и стенкой, изменение потенциала стенки эквивалентно противоположному по знаку изменению потенциала ВВЭ, что и приводит к наблюдаемым вариациям параметров ВИ.

Влияние постоянного смещения на напряжение пробоя исследовано для пробоя положительными импульсами. Если смещение u_0 тоже положительно, то напряжение пробоя U_b растет, причем на величину, близкую к u_0 . Это становится понятным, если предположить, что стенка вблизи ВВЭ приобретает потенциал, примерно равный u_0 . Тогда для того, чтобы смог произойти первичный пробой, потенциал ВВЭ должен быть увеличен на эту же величину. Отрицательное смещение u_0 вызывает, как и следовало ожидать, такое же по абсолютной величине уменьшение U_b . Однако для некоторого значения u_0 может наблюдаться, напротив, скачкообразное удвоение напряжения пробоя. Оптические наблюдения показывают появление в этот момент аномально медленной ВИ, которая не сопровождается пробоем. Это может быть связано с тем, что стенка приоб-

ретает потенциал, близкий к u_0 , вблизи анода, а при удалении от него его абсолютная величина уменьшается. В этом случае *разность* потенциалов между электродом и стенкой достаточна для генерации волны, но не достаточна для поддержания ее нормального распространения. В то же время она заряжает стенку вблизи анода, и теперь для генерации новой ВИ требуется напряжение, близкое к удвоенному. Эта волна уже приводит к полноценному пробую.

При исследовании влияния импульсного смещения потенциала ВВЭ на напряжение пробоя выяснилось, что такое влияние не наблюдается, если импульс смещения закачивается до окончания разряда. Напротив, влияние есть, если импульс смещения начинается после окончания предыдущего разрядного импульса с задержкой, не превышающей, в зависимости от условий, 2–12 мс. При такой задержке воздействие импульса смещения на следующий пробойный импульс заметно в течение десятков минут. Если длительность импульса смещения $\tau \sim 1$ мс или больше, его влияние оказывается таким же, как при постоянном потенциале смещения. При уменьшении τ эффект ослабевает, но остается существенным вплоть до $\tau \sim 1$ мкс. Оптические исследования показали, что импульс смещения создает на своем переднем фронте волну ионизации, которая движется с убывающей яркостью излучения и скоростью. Расстояние, на которое проникает ВИ, растет с увеличением амплитуды импульса u_0 . Движение ВИ сопровождается протеканием анодного тока, который заряжает стенку. Величина заряда, найденная путем интегрирования тока, увеличивается с ростом u_0 и с приближением импульса смещения к моменту обрыва разряда. Заряд распределен равномерно по той области, в которую проникла ВИ, а его поверхностная плотность растет пропорционально напряжению u_0 . ВИ является не единственным источником заряда стенки. Из экспериментов с двумя импульсами смещения следует, что смещающее поле в условиях распада плазмы, оставшейся после импульса смещения, также приводит к заряду стенки, усиливая эффект, создаваемый волной.

Подобным образом может быть объяснено действие постоянного смещающего потенциала. Такой потенциал не создает ВИ, а стеночный заряд, оставленный волной на фронте разрядного импульса, “стирается” разрядом. Но затем плазма послесвечения разряда оказывается в поле напряжения смещения, и в конце процесса своего распада заряжает стенку.

Таким образом, из результатов работы следует, что можно, прикладывая к ВВЭ трубки постоян-

ное или импульсное напряжение сравнительно небольшой амплитудой, заметно менять характеристики пробоя — свойства волны ионизации и потенциал зажигания разряда. В частности, это можно осуществлять с помощью короткого, вплоть до микросекундной длительности, импульса. В определенных условиях можно повысить электрическую прочность разрядного промежутка почти в полтора–два раза.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-02-00288.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Behnke J.F., Bindemann T., Deutsch H., Becker K. // Contrib. Plasma Phys. 1997. V. 37. P. 345.
2. Uhrlandt D., Schmidt M., Behnke J.F., Bindemann T. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 2475.
3. Golubovskii Yu.B., Maiorov V.A., Behnke J., Behnke J.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 751.
4. Li M., Li C., Zhan H., Xu J. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. 031503.
5. Ambrico P.F., Ambrico M., Schiavull L., De Benedictis S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. 305201.
6. Tschiersch R., Bogaczyk M., Wagner H.-E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. 365204.
7. Wild R., Benduhn J., Stollenwerk L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. 435204.
8. Tschiersch R., Nemschokmichal S., Meichsner J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. 075006.
9. Недоспасов А.В., Новик А.Е. // ЖТФ. 1960. Т. 30. С. 1329.
10. Ионих Ю.З. Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 928.
11. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. С. 263.
12. Shishpanov A.I., Meshchanov A.V., Kalinin S.A., Ionikh Y.Z. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. 065017.
13. Meshchanov A.V., Ivanov D.O., Ionikh Y.Z., Shishpanov A.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. 335202.
14. Horstman R.E., Lansink F.M.O. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 1130.
15. Gendre M.F., Haverlag M., Kroesen G.M.W. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. 234004.
16. Калинин С.А., Капитонова М.А., Матвеев Р.М., Мещанов А.В., Ионих Ю.З. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 870.
17. Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Иванов Д.О. // ЖТФ. 2019. Т. 89. С. 1009.
18. Мещанов А.В., Коришунов А.Н., Ионих Ю.З., Дятко Н.А. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 736.
19. Мещанов А.В., Ионих Ю.З., Шишпанов А.И., Калинин С.А. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 936.
20. Колоколов Н.Б., Благоев А.Б. // УФН. 1993. Т. 163. С. 55.