

Г.В. Колбычев, И.В. Пташник

ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В ОТКРЫТОМ РАЗРЯДЕ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.09.99 г.

Представлены результаты измерений распределения электрического поля в открытом разряде. Измерения выполнены посредством электростатических зондов в виде пакета диафрагм. Полученные профили поля $E(x)$ хорошо согласуются с результатами спектроскопических измерений [6]. Установлено, что эффективная генерация электронного пучка происходит в переходной фазе разряда при сильном запаздывании процессов накопления объемного заряда в межэлектродном промежутке и формирования катодной области падения потенциала относительно тока разряда. Показана необоснованность отнесения открытого разряда к классу тлеющих разрядов.

В 1980 г. было обнаружено, что в узком разрядном промежутке со сплошным металлическим катодом и сетчатым анодом при давлении газа в десятки килопаскалей эффективно генерируется электронный пучок с энергиями 2...7 кэВ [1]. Впоследствии импульсный разряд, реализуемый в этих условиях, получил название «открытого» [2]. О механизме открытого разряда до сих пор нет единого мнения [3–5].

В работе [3] утверждается, что это – хорошо известный аномальный тлеющий разряд, тогда как в [4, 5] – что это отличный от тлеющего разряда режим. Но и здесь режим и определяющие его процессы авторы трактуют по-разному. Существенно прояснить ситуацию, на наш взгляд, могли бы надежные данные по распределению электрического поля по длине разрядного промежутка и его эволюции во времени.

В настоящее время имеется лишь одна работа [5], где зондовым методом измерены профили поля в открытом разряде в неоне. Оказалось, что уже при плотности тока разряда $\sim 0,6 \text{ А/см}^2$ (напряжение на разряде $U_d \sim 2,4 \text{ кВ}$) в промежутке длиной $d = 1,2 \text{ мм}$ и давлении неона $P = 600 \text{ Па}$ формируется область катодного падения потенциала (КПП) размером $\delta \sim 0,9 \text{ мм}$. При плотности тока $\sim 4 \text{ А/см}^2$ ($U_d \approx 4 \text{ кВ}$) поле практически полностью сосредоточено в прикатодном слое толщиной $\sim 0,2 \text{ мм}$. В качестве зондов служили сетки, натянутые поперек разрядного промежутка и привязанные через делитель напряжения к катоду и аноду. Однако наши эксперименты по ускорению пучков в последовательно расположенных промежутках между сетчатыми электродами показали их низкую электрическую прочность в присутствии даже весьма слабого проходящего электронного пучка. При разности потенциалов на сетчатых электродах в несколько сотен вольт между ними возникает электрический разряд. Таким образом, размещение сеток-зондов в межэлектродном промежутке существенно меняет динамику разряда и распределение поля в нем. Вследствие сказанного на результаты измерений [5] нельзя опираться в дальнейших исследованиях.

В 1995 г. появилась работа [6], иллюстрирующая применимость метода поляризационной спектроскопии для измерения сильных электрических полей в газе и, в частности, в открытом разряде. К сожалению, измерения сделаны лишь для одного конкретного случая в довольно длинном разрядном промежутке и при низком напряжении, т.е. в условиях плохой генерации электронного пучка. Этих данных со-

вершенно недостаточно для выяснения физики открытого разряда.

Целью настоящей работы является изучение распределения поля в открытом разряде в разные моменты времени при токах, типичных для процесса генерации пучка электронов.

Методика и результаты эксперимента

Измерения потенциала проведены с помощью электростатических зондов. В качестве последних служили диафрагмы с диаметром отверстия 11,5 мм из медной фольги толщиной 50 мкм. Пакет из соосно расположенных диафрагм и изолирующих их слоев толщиной 0,2 мм и общей длиной 1,2 мм определял поперечные размеры открытого разряда ($S_d \approx 1 \text{ см}^2$).

Предварительные испытания промежутка с одним зондом такого типа в открытом разряде, а также в аномальном тлеющем разряде показали его работоспособность в сильных электрических полях. Измерение потенциала непосредственно на диафрагме сопряжено с рядом трудностей, связанных с минимизацией влияния измерительной цепи на величину потенциала, устранением наводок от рядом расположенных высоковольтных цепей, искажением сигнала паразитными емкостями и пр. Поэтому перед эксплуатацией измерительная система подверглась тестированию по следующим параметрам.

1. Обеспечение заданной максимальной длительности получения сигнала без искажений. Проверялось наложением осциллограмм сигналов с зондов на сигнал напряжения на катод (разумеется, при соответствующем усилении первых) при откачанной разрядной камере. Искажение связано с разрядом собственной емкости зонда через измерительную цепь и поэтому нарастает со временем. Достигнуто совпадение указанных сигналов с отклонением не более 10% по истечении 2 мкс после подачи напряжения.

2. Обеспечение требуемого быстродействия и отсутствия задержки сигналов на зондах. Проверялось реакцией снимаемых сигналов на краткое возмущение электрического поля в разрядном промежутке. Такие возмущения возникают при слабом искрении катода. При этом генерируются импульсы тока амплитудой $\sim 0,5 \text{ А}$ и длительно-

стью 2 ... 5 нс. Проверка проведена при искрении в центральной части катодной поверхности, т.е. в случае наибольшего удаления возмущения от зондов.

3. Проверка на адекватность реакции сигналов на зондах на возмущение поля в промежутке, т.е. калибровка сигналов. Она выполнена для двух крайних случаев:

а) при отсутствии разряда в промежутке (тогда амплитуды сигналов на диафрагмах линейно уменьшаются по мере удаления от катода);

б) при сильном искрении катода далеко от краев диафрагм с образованием плазменного канала высокой проводимости (тогда сигналы на зондах одновременно падают до нуля).

Измерения проведены в гелии. Коллектор электронного пучка находился на расстоянии 45 мм от анода. Величина разрядной емкости – 470 пФ. Обычно при длине разрядного промежутка $d \sim 0,5$ мм ток анода заметно запаздывает относительно тока пучка [4]. Но в данном случае, при $d = 1,2$ мм, в интересном в практическом плане диапазоне давлений гелия амплитудные значения

импульсов тока пучка и анодного тока достигаются одновременно. Затем ток пучка снижается значительно быстрее, чем ток в анодной цепи. В частности, при снижении тока пучка вдвое анодный ток снижается лишь на 20 ... 30 %.

Измерения распределения электрического поля проведены для трех моментов времени: на середине нарастания тока пучка, при достижении им амплитудного значения и на середине его спада. В каждый из этих моментов измерялась абсолютная величина напряжения на катоде, U_+ , U_e , U_- соответственно, и относительные к нему значения потенциала на зондах. Затем по разности потенциалов на соседних зондах определялась средняя величина напряженности поля и присваивалась середине пространственного интервала между этими зондами. Измеренные распределения потенциала в разрядном промежутке и рассчитанные по ним распределения напряженности поля приведены на рис. 1 и 2. Конечно, распределение поля $E(x)$ между катодом и первым зондом, как и поле около анода, может быть представлено лишь предположительно.

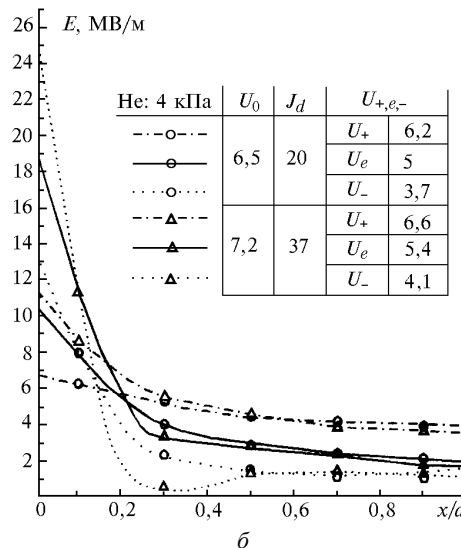
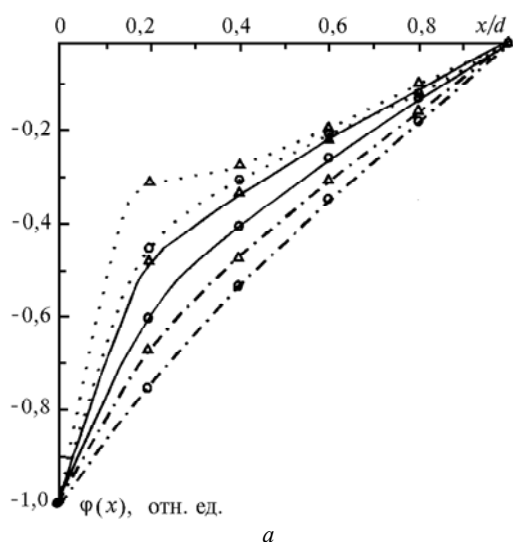


Рис. 1. Результаты измерений распределения потенциала $\varphi(x)$ (а) и рассчитанного по ним распределения напряженности электрического поля (б) по длине разрядного промежутка ($U_{0+,e,-}$, кВ, J_d , А/см²); - - - измерения на середине переднего фронта импульсного тока; — при амплитудном значении тока; ···· на середине спада тока

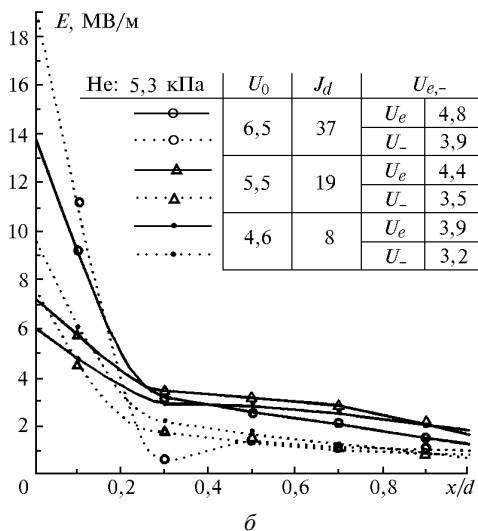
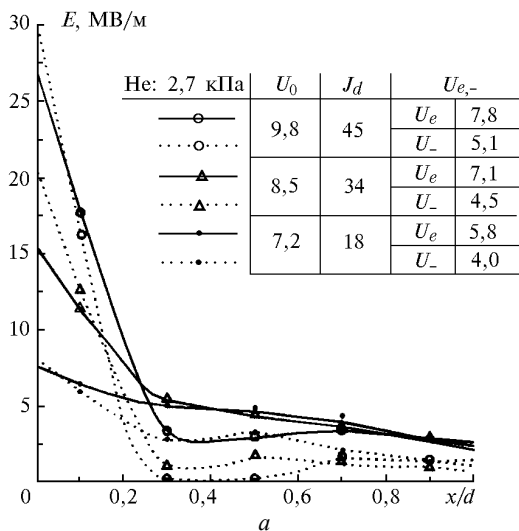


Рис. 2. Распределения напряженности электрического поля по длине разрядного промежутка, полученные при различных условиях. Единицы измерения те же, что и на рис. 1

Обсуждение полученных результатов

Во-первых, отметим, что вид приведенных на рис. 1 и 2 распределений $E(x)$ при сформированной области КПП аналогичен полученному оптическим методом в [6]. Такое совпадение представляется важным, поскольку свидетельствует о корректности тестовых методик.

Далее, эксперимент показал, что на середине нарастания тока поле в разрядном промежутке еще слабо искажено объемным зарядом ионов, но последний быстро увеличивается. Тем не менее в момент максимального тока пучка (суммарный ток разряда $I_d \sim 40$ А при 2,6 кПа, ~ 35 А при 4 кПа, ~ 20 А при 5,3 кПа) сильное поле, на порядок превышающее пороговое значение для убегания электронов, имеется на всей длине разрядного промежутка, но при этом на прикатодной области шириной $\sim 0,3$ мм падает до половины приложенного напряжения. В дальнейшем, несмотря на начавшееся уменьшение тока разряда, процесс локализации поля у катода и формирования области КПП продолжается. Следовательно, генерация электронного пучка в нашем случае происходит в условиях существенной нестационарности. Обобщенное название этой стадии разряда – фаза быстрой коммутации.

Рассмотрим вопрос о процессах, определяющих развитие разряда в этой фазе в узких межэлектродных промежутках в условиях эффективной генерации электронных пучков. Авторы [3, 7] утверждают, что а) квазистационарная фаза, следующая за фазой быстрой коммутации, является аномальным тлеющим разрядом; б) генерация электронного пучка в аномальном тлеющем разряде происходит с эффективностью $\sim 80 \dots 90\%$; в) фаза быстрой коммутации и тлеющие разряды имеют один и тот же механизм развития. Вначале обратимся к работе [7], поскольку полученные в ней выводы являются базовыми для аргументации [3]. Итак, в [7] измерена вольтамперная характеристика (ВАХ) квазистационарной фазы разряда и проведено ее сравнение с формулой ВАХ для стационарного аномального тлеющего разряда

$$J_d/P_2 = 2,5 \cdot 10^{-12} U_k^3, \quad (1)$$

где J_d измеряется в амперах на сантиметр в квадрате; P – в торрах; U_k – в вольтах.

Совпадение измеренной ВАХ с соотношением (1) является доказательством п. «а». Авторы утверждают, что такое совпадение получено для всех измерений. Однако в [7, рис. 2, б] приведены осциллограммы тока I_e и U_k , полученные в промежутке длиной 0,5 мм, при давлении гелия 26,6 торр, площадью катода 0,8 см², начальном напряжении на разрядной емкости 10 кВ и балластном сопротивлении 75 Ом. В квазистационарной фазе ток пучка составлял ~ 7 А и $U_k \approx 6,5$ кВ. Отсюда получаем $J_d \approx (10-6,5) \cdot 10^3 / (75 \cdot 0,8) \approx 68$ А/см². А формула (1) при тех же значениях U_k и P дает $J_d \approx 485$ А/см², т.е. в 7 раз больше! Какое уж тут совпадение. Далее, с учетом прозрачности анодной сетки ($\mu = 75\%$) получаем эффективность генерации электронного пучка в этом эксперименте: $\eta = 4 I_e / (3 \cdot I_d) = 28/163 = 17,2\%$. При $P = 40$ торр [7, рис. 1, а] она еще меньше. Таким образом, утверждение п. «б» также не подтверждается. Утверждение п. «в» основано на одинаковых коммутационных характеристиках разряда при $d \gg \delta$ [7, рис. 4]: поскольку характеристики не зависят от длины разрядного промежутка, следовательно

никаких особенностей в механизме развития разряда в узких промежутках нет.

По нашему мнению, этот аргумент не доказывает идентичность механизмов открытого разряда и фазы быстрой коммутации объемных разрядов. Действительно, зависимость коммутационных характеристик от d может быть слабой или вообще внешне не проявляться. Принципиально важным является другое: при изменении длины разрядного промежутка в открытом разряде меняется структура тока. Например, в гелии с $P = 80$ торр при $U_0 = 8$ кВ и расстоянии анод – коллектор $L = 2,2$ см в промежутках длиной 0,5 и 1 мм нами были получены импульсы тока разряда $I_d = I_e + I_a$ с почти одинаковой амплитудой и длительностью ~ 75 А и ~ 25 нс. Однако при $d = 1$ мм отношение I_e/I_a было 20/55, а при $d = 0,5$ мм – 32/41. Или, с учетом перехвата части пучка анодной сеткой ($\mu = 75\%$), эти отношения будут 27/48 и 43/30 соответственно. Следовательно, размер межэлектродного промежутка является важным фактором, определяющим генерацию электронного пучка. Но эффективность генерации существенно влияет на ВАХ открытого разряда [4, 8], изменение которой означает изменение режима, что, в свою очередь, указывает на изменение механизма разряда. Таким образом, проведенный анализ показал, что утверждения п. «б» и «в», имеющие принципиальное значение, в работе [7] не доказаны и поэтому ссылки автора [3] на эту работу не обоснованы. Что касается п. «а», то в [4] разряд, генерирующий пучок с низкой эффективностью, был отнесен нами к тлеющему разряду. Было показано, что такой разряд обладает определенной переходной ВАХ $F(U_d) = d(\ln I(t))/dt \propto U_d^b$ с $\beta \sim 2,5$. И в этом плане результаты [7] лишь подтверждают выводы [8]. Но эффективная генерация пучка происходит, согласно [4, 8], в другом режиме, когда $F(U) \propto U_d^b$ при $\beta \leq 1$. Этот режим реализуется при сильном влиянии УФ-подсветки.

Далее обратимся к работе [3]. Отметим то обстоятельство, что все исследования в ней режима разряда выполнены при крайне низком давлении газа (200...340 Па гелия при высоком напряжении, до 600 Па неона при низком напряжении) и малом расстоянии от анода до коллектора ($\sim 20 \dots 30$ мм). Очевидно, что в таких условиях УФ-подсветка катода излучением возбужденного газа в заанодной области пучком или обратным током крайне мала [9]. Разряд, конечно, тлеющий. Поскольку тормозная способность газа на пути к коллектору также весьма низкая, то практически все электроны, рожденные в области катодного падения потенциала, достигают коллектора и дают вклад в ток пучка. В этом случае эффективность генерации пучка выражается соотношением

$$\eta = 1 - J_+(\delta) / [J_+(0)(1 + \gamma)], \quad (2)$$

где γ – коэффициент электронной эмиссии катода; $J_+(\delta)$ и $J_+(0)$ – ионный ток на границах области КПП. Если в КПП выполняется условие для существования самостоятельного разряда, тогда $J_+(\delta) = 0$ и $\eta \rightarrow 100\%$. Но даже если оно не выполняется, то в условиях экспериментов ($U \sim 10$ кВ, $P \sim 290$ Па гелия, $\delta \sim 3$ мм, см. [3, рис. 4]) величина γ по данным [10] составляет ~ 3 и эффективность η все равно довольно высокая. В режиме, близком к рассмотренному, работают пушки [11], предназначенные для электронно-лучевой сварки (гелий 133 Па, 10 кВ). Автор [3] полагает, что с повышением давления режим разряда и эффективность генерации пучка в нем не из-

меняются. Но эксперименты [7] дали сильное снижение эффективности с повышением давления газа.

Полученные нами данные дают новые аргументы против отнесения открытого разряда к классу тлеющих разрядов. Материал, представленный на рис. 1 и 2, свидетельствует, что накопление объемного заряда в межэлектродном промежутке и формирование области КПП сильно запаздывают относительно тока разряда. Осциллографическая картина импульсов I_e и I_a показывает, что мгновенное значение эффективности генерации [4, 12] пучка монотонно уменьшается по мере развития разряда. Если исходить из представлений [3, 7] о механизме открытого разряда, то снижение эффективности генерации пучка в процессе развития непонятно. Действительно, формирование области КПП и сужение ее размера ведут к возрастанию напряженности поля на катоде. При этом увеличиваются энергии ионов и быстрых атомов, а значит, и коэффициент электронной эмиссии с катода [10]. Отсюда должно расти и мгновенное значение эффективности генерации электронного пучка. А на практике получаем обратное.

Считается, что в коротких межэлектродных промежутках область слабого поля возникает у анода, а затем расширяется к катоду [3, 12]. Материал, приведенный на рис. 1, 2, не согласуется с этими представлениями. Оказывается, что локальная область слабого поля возникает внутри разрядного промежутка, отрезая тем самым область КПП от остальной части разряда, и лишь затем расширяется в сторону анода. Такая картина скорее соответствует формированию разряда в длинном межэлектродном промежутке, когда условие для протекания разряда

$$\gamma \cdot K(x) = 1 \quad (3)$$

выполняется для точки $x < d$. Здесь $K(x)$ – коэффициент размножения зарядов при пробеге электронной лавины расстояния от катода до точки x . Но сильное запаздывание накопления объемного заряда в промежутке относительно тока разряда возможно лишь при очень малой величине $K(d)$ вследствие перевода электронов в режим убегания [12]. В этом случае для выполнения (3) требуется весьма высокое значение коэффициента γ . Бомбардировка катода ионами и быстрыми атомами в полях, реализуемых в условиях эксперимента (см. рис. 1, 2), такие значения γ не обеспечивает [10]. По нашему мнению, наблюдаемая картина распределения поля в межэлектродном промежутке объясняется большим вкладом в коэффициент γ фотоэлектронной эмиссии вследствие УФ-подсветки катода излучением из заанодной области. Определение источника такой подсветки – тема отдельного исследования.

G.V. Kolbychev, I.V. Ptashnik. Measurement of Electric Field Distribution in the Open Discharge.

The results of measurements of electric field distribution in so-called «open» discharge are presented. These measurements were made by means of electrostatic probes in the form of a set of foil diaphragms. The obtained structures of a field $E(x)$ are in good agreement with the results of optical measurements [6]. It is established that an efficient e -beam generation occurs in the transient phase of the discharge at great time delay of the processes of space charge accumulation in interelectrode gap and formation of cathode-fall region with respect to current. It is also shown that a treatment of the open discharge as a glow one is unjustified.

Закключение

Представленные исследования показали возможность измерения потенциала вдоль разрядного промежутка с помощью электростатических зондов в виде диафрагм, охватывающих столб разряда. Процедура тестирования дает основания полагать, что зонды не вносят искажения в динамику разряда и снимаемые с них сигналы с достаточной степенью точности отражают истинное значение потенциала на данном расстоянии от катода. Хотя, конечно же, окончательное заключение о достоверности метода может дать лишь сравнение с измерениями, полученными другими методами, лучше – оптическими, например поляризационной спектроскопии [6].

Экспериментально установлено, что накопление объемного заряда в межэлектродном промежутке и формирование области катодного падения потенциала сильно отстают от тока разряда. Это проявляется в том, что при отсутствии области КПП через промежутки протекает ток плотностью до $30 \dots 40 \text{ A/cm}^2$ и такая переходная фаза разряда имеет длительность $\sim 20 \dots 40 \text{ нс}$. В течение ее эффективность генерации электронного пучка высока ($\sim 70 \dots 90\%$) и снижается со временем. При формировании узкой области КПП ($\delta \ll d$) разряд переходит в квазистационарную фазу аномального тлеющего разряда. Эффективность генерации пучка электронов в ней при давлении гелия свыше 2 кПа мала ($\sim 10 \dots 20\%$) [7].

Механизмы, определяющие динамику тлеющих разрядов, не могут объяснить высокую эффективность генерации электронного пучка в фазе быстрой коммутации. Но это явление естественным образом объясняется фотоэлектронным механизмом, исследованным нами ранее [4, 8, 12].

1. Бохан П.А., Колбычев Г.В. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 7. С. 418–421.
2. Бохан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 1. С. 88–95.
3. Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 3. С. 33–38.
4. Колбычев Г.В., Пташник И.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 9. С. 104–110.
5. Бохан П.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 6. С. 61–68.
6. Демкин В.П., Королев Б.В., Мельничук С.В. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 1. С. 81–84.
7. Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 9. С. 138–142.
8. Колбычев Г.В., Пташник И.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 18. С. 1106–1110.
9. Колбычев Г.В., Колбычева П.Д., Забудский О.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 3. С. 247–252.
10. Hayden H.C., Uterback N.G. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 6A. P. 1575–1579.
11. Мельник В.И., Новиков А.А. // Электронная обработка материалов. 1972. № 1. С. 84–86.
12. Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–649.