

А. М. Резикян

Ионообразование в катодной части тлеющего разряда

(экспериментальная часть)

§ 1. Введение

В статье [1] было показано, что место образования ионов, возникающих в катодной части тлеющего разряда и доходящих до катода, можно определить экспериментально, независимо от имеющейся теории катодной части. Выражение, полученное для средней длины пути $\bar{S}_k$ всех ионов образующихся в катодной части и доходящих до катода, имеет вид

$$\bar{S}_k = 0,133 \frac{\Delta p}{p} \frac{b_1}{j}, \quad (1)$$

где p — давление в мм рт. ст., Δp — разность давлений нейтрального газа между катодом и анодом разряда в мм рт. ст., j — плотность разрядного тока в mA/cm^2 , а b_1 — подвижность положительных ионов при давлении 1 мм рт. ст.

Таким образом, измеряя p , j и Δp , мы можем определить $\bar{S}_k$. Однако нас больше интересует величина q , равная отношению средней длины пути всех ионов доходящих до катода $\bar{S}_k$ (т. е. центра тяжести их образования) к ширине области катодного падения потенциала d , т. е.

$$q = \frac{\bar{S}_k}{d} = 0,133 \frac{b_1}{jd} \frac{\Delta p}{p}. \quad (2)$$

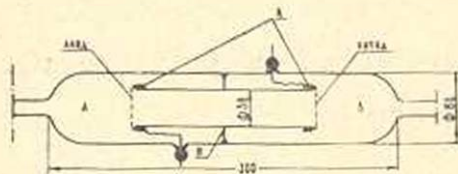
Величина q достаточно хорошо определяет место возникновения ионов. Если $q \ll 1$, т. е. $\bar{S}_k \ll d$, то почти все ионы возникают в области катодного падения потенциала, а при $q \gg 1$ ($\bar{S}_k \gg d$) подавляющая часть ионов возникает в области второго катодного свечения (тлеющее свечение).

Такой экспериментальный анализ изменения q в зависимости от условий тлеющего разряда, очевидно, представит интерес, он явится одним из критериев для проверки существующих теорий катодной части тлеющего разряда.

§ 2. Разрядная трубка

В статье [1] мы уже установили, что для измерения разности давлений Δp и определения q с помощью уравнения (2), необходимо иметь электроды газоразрядного промежутка из сетки.

Разрядный промежуток находился в стеклянном цилиндре (фиг. 1), электродами служили никелевые сетки густотой 10000 ячеек на квадратном сантиметре. Сетки на торцах внутреннего цилиндра зажимались стальными пружинками Л. Объем А от объема В был изолирован стеклянной перегородкой П.



Фиг. 1.

Принцип работы такой трубки следующий. В разряде ионы, передавая свой импульс газу, перекачивают газ из объема А в объем В до тех пор, пока возникающая разность давлений нейтрального газа не уравнивается электрическими силами, действующими в объеме разряда. Возникающая разность давлений между катодом и анодом измерялась стеклянным мембранным манометром.

Особым требованием должна удовлетворять сетка катода. Если по всей поверхности катода густота сетки и плотность разрядного тока постоянны*, то на катоде образованная область катодного падения потенциала будет всюду одинаковой ширины. В противном случае, ширина области катодного падения потенциала не будет одинакова по всей поверхности катода. Места, где сетка редкая, подобны отверстиям, через которые газ может течь обратно в объем разряда и этим уменьшать разность давлений, созданную ионами. Неравномерность плотности разрядного тока приведет к таким же явлениям.

Описанные сетки давали возможность получить равномерный разряд в интервале давления от 10^{-2} до 8 мм рт. столба при плотности тока в несколько миллиампер на квадратный сантиметр катода.

§ 3. Стеклянный мембранный манометр

Стеклянный мембранный манометр измеряет разность давлений газа с помощью изменения электроемкости. Изменение емкости происходит между неподвижным металлическим электродом и тонкой упругой посеребренной стеклянной мембраной (фиг. 2). Тонкая мембрана толщиной от 5 до 20 микрон натянута на стеклянном шарике.

Ошибка мембранного манометра доходила до $5 \div 7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. столба.

При заданной толщине мембраны, расстояние между электродами выбиралось такое, чтобы достигалась необходимая чувствитель-

* Исключая искажение на краях катода около стен трубки.

ность. Это делалось на специальной установке, дающей возможность быстро проверять чувствительность при изменении расстояния. Электроды 1 и 2 соединялись с измерителем приращения емкости.

После градуировки манометра, его присоединяют к концам газоразрядной трубки, для измерения разности давлений в ней.

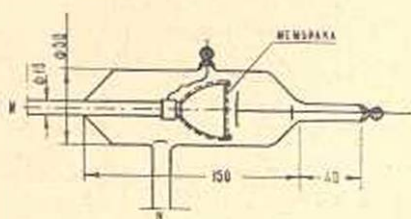
Установлено, что стеклянный мембранный манометр по сравнению с металлическими имеет некоторые преимущества.

1) При большом изгибе стеклянной мембраны толщиной в $7-15$ микронов не появляется заметной величины остаточной деформации. Этот предельный изгиб соответствует разности давлений $0,1$ мм рт. столба, при чувствительности равной $0,001$ мм рт. столба.

2) Мембранный манометр припаянный к стеклянной аппаратуре может быть откачен с помощью нагрева до 350°C , благодаря чему достижима большая степень очистки аппаратуры.

3) Указанным манометром можно измерить разность давлений в газах и парах таких веществ, которые реагируют с любыми другими веществами, кроме стекла. При этом газы и пары не имеют контакта с серебром, так как серебро нанесено на наружной поверхности шарика и мембраны.

4) Легко можно изготовить манометры с стеклянной мембраной, ошибки которых не превышают $5-7 \cdot 10^{-4}$ мм рт. столба.

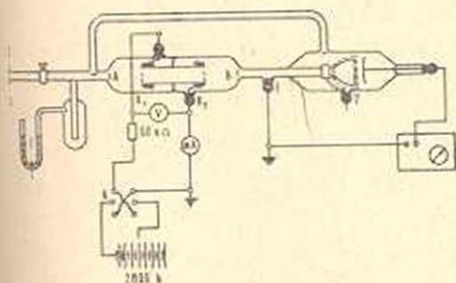


Фиг. 2.

§ 4. Экспериментальная установка

Для измерения разности давлений нейтрального газа между катодом и анодом, к концам разрядного промежутка соединялся мембранный манометр (фиг. 3). Напряжение на электроды разрядного промежутка подавалось от выпрямителя и могло регулироваться.

С помощью трехфазного переключателя можно было менять полярность электродов. Независимо от полярности, электрод K_2 всегда оставался заземленным. Это заземление избавляло от случайных разрядов между электродом K_2 и мембраной манометра. Для дальнейшего предостережения пробоя, на мембрану в суженной части вставлялась предохраняющая сетка. Сетка 1 и мембрана 2 также заземлялись.



Фиг. 3.

Для дальнейшего предостережения пробоя, на мембрану в суженной части вставлялась предохраняющая сетка. Сетка 1 и мембрана 2 также заземлялись.

Перед началом опытов вся система предварительно обезгаживалась в печи до температуры 350°C . Затем наполнялась исследуемым газом и долго тренировалась разрядом, после чего система откачивалась. Этот процесс несколько раз повторялся, пока во всей системе получалась необходимая чистота. После такой очистки, по всему объему газоразрядного цилиндра удавалось получить достаточно равномерный разряд.

Длина газоразрядного промежутка во всех опытах была одинакова и равнялась 55 мм, а диаметр — изменялся.

Основные измерения проводились после некоторых предварительных. Через разрядный промежуток, наполненный аргоном до давления 4 мм рт. столба, в течение одного часа протекал разрядный ток плотностью 2 мА/см². В течение такого большого промежутка времени определено было достигнуто тепловое равновесие. Образованная разность давлений нейтрального газа все время оставалась неизменной. С помощью рубильника *K* (фиг. 3), внезапно менялась полярность электродов разрядного промежутка, в связи с чем на приборе измерителя приращения емкости можно было наблюдать внезапное изменение направления роста давления газа. При этом абсолютное значение разности давлений оставалось постоянным и менялось только направление роста давления газа. Давление на катоде всегда было больше, чем на аноде. Это значит, что направление увеличения давления газа всегда совпадало с направлением положительных ионов, т. е. разность давлений нейтрального газа в основном создается положительными ионами. Это обстоятельство подтверждает предположение, высказанное в [1].

То обстоятельство, что разность давлений не меняется во времени при постоянной плотности разрядного тока, показывает, что нагрев электродов не влияет на измерения.

С другой стороны, так как при выключении разряда разность давлений сейчас же исчезает, можно утверждать, что никакие тепловые эффекты не влияют на измерения.

Зависимость разности давлений нейтрального газа от плотности разрядного тока и от давления газа изучена для аргона, азота и водорода. Ниже, в таблицах приведены результаты этих опытов. Они показывают, что

а) при постоянном давлении газа, плотность разрядного тока, протекающего через него, пропорциональна разности давлений газа между катодом и анодом,

б) при постоянной плотности разрядного тока, разность давлений газа между анодом и катодом для аргона пропорциональна, а для азота и водорода — обратно пропорциональна давлению газов.

Такая качественная разница между инертным и молекулярным газами, выявленная в пункте б) будет объяснена ниже.

Результаты измерений и вычислений приведены в таблицах 1—3.

Результаты измерений для аргона ($b_1^+ = 1 \times 10^3 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$)

Таблица 1

Плотность разрядного тока j ма/см ²	$\Delta p \cdot 10^3$ мм рт. ст.	$\bar{S}_k$ см	d см	q	P мм рт. ст.	v вольт
0,5	0,90	0,095	0,080	1,18	2,5	237
1,0	1,40	0,075	0,057	1,30		270
1,5	1,65	0,059	0,050	1,18		320
2,0	1,80	0,048	0,040	1,20		380
2,5	1,90	0,041	0,030	1,38		450
0,5	1,90	0,100	0,037	2,70	5,0	247
1,0	2,90	0,076	0,036	2,10		250
1,5	3,45	0,061	0,034	1,80		255
2,0	3,70	0,048	0,033	1,46		260
0,5	2,90	0,098	0,024	4,10	8,0	244
1,0	4,40	0,074	0,023	3,10		246
1,5	5,20	0,058	0,023	2,50		250
2,0	5,85	0,047	0,021	2,20		256

Результаты измерений для азота

$$\left(b_1^+ = 9,7 \times 10^3 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \frac{\text{вольт}}{\text{см}} \right)$$

Таблица 2

j ма/см ²	$\Delta p \cdot 10^3$ мм рт. ст.	$\bar{S}_k$ см	d см	q	P мм рт. ст.	v вольт
0,2	2,00	0,850	0,074	11,4	1,5	1060
0,4	4,00	0,850	0,074	11,4		1560
0,6	6,20	0,880	0,073	11,2		2250
0,2	1,45	0,310	0,048	6,5	3,0	610
0,4	2,30	0,240	0,038	6,3		830
0,6	3,10	0,220	0,037	6,0		960
0,8	3,60	0,200	0,036	5,4		1100
0,2	1,20	0,154	0,034	4,5	5,0	470
0,4	1,90	0,120	0,033	3,6		530
0,6	2,45	0,104	0,032	3,3		580
0,8	2,95	0,083	0,027	3,1		650
1,0	3,20	0,078	0,025	3,1		710

Результаты расчетов, приведенных в таблицах, показывают, что положенным в основу теории [1] предположением о создании разности давлений газа положительными ионами, можно объяснить наблюдаемые физические явления.

Результаты измерений для водорода

$$\left(b_1^+ = 4,5 \cdot 10^2 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \frac{\text{вольт}}{\text{см}} \right)$$

Таблица 3

j ма/см ²	$\Delta p \cdot 10^3$ мм рт. ст.	S_k см	d см	q	P мм рт. ст.	U вольт
0.5	2.30	4.250	0.460	11.7	0.6	600
1.0	4.50	4.140	0.360	11.7		1400
1.5	6.50	4.000	0.345	11.5		1860
2.0	8.30	3.800	0.335	11.5		2200
0.5	1.20	0.550	0.120	4.6	2.5	770
1.0	2.50	0.600	0.110	5.4		855
1.5	3.60	0.520	0.097	5.3		1030
2.0	4.45	0.490	0.095	5.1		1130
2.5	5.20	0.470	0.087	5.3		1250
0.5	0.80	0.164	0.090	1.8	5.5	465
1.0	1.50	0.152	0.090	1.7		470
1.5	2.10	0.140	0.089	1.6		475
2.0	2.60	0.131	0.088	1.5		482
2.5	3.15	0.128	0.088	1.4		485
3.0	3.50	0.118	0.086	1.3	7.5	492
0.5	0.50	0.070	0.037	1.9		960
1.0	1.10	0.077	0.035	2.2		920
1.5	1.45	0.068	0.034	2.0		950
2.0	1.70	0.060	0.033	1.8		980
2.5	1.90	0.053	0.033	1.6		1025

Существует еще одна возможность для проверки принятого исходного предположения. Известно, что плотность разрядного тока на краях разрядного промежутка меньше, чем в середине разряда, так как около периферии существует потеря ионов и электронов на стенку разрядной трубки. Краевой эффект увеличивается с уменьшением диаметра и наоборот. В действительности мы измеряем только среднее значение плотности разрядного тока, поэтому, при постоянной величине средней плотности, эффективная плотность в середине тем больше, чем меньше диаметр разрядной трубки. Значит, чем меньше диаметр разрядной трубки, тем относительно большая доля зарядов попадает на стенку. Причиной, приводящей к увеличению разности давлений (или средней длины пути ионов) при уменьшении диаметра разрядной трубки, является потеря ионов на стенку у периферии разряда.

Не все ионы, движущиеся около периферии, попадают на катод, часть их попадает на стенку. Попадающая на стенку часть ионов создает разность давлений нейтрального газа, соответствующую своему

импульсу. Эту часть тока, однако, измерить невозможно. Поэтому, при уменьшении диаметра разрядной трубки (при неизменных прочих условиях), надо ожидать увеличения разности давлений.

Для проверки указанного эффекта были проведены опыты по измерению Δp при разных диаметрах разрядной трубки. Результаты приведены в таблицах 4 и 5.

Значения $\Delta P \cdot 10^3$ в мм рт. ст. для
азота при $P=3$ мм рт. ст.

Таблица 4

j $\frac{\text{ма}}{\text{см}^2}$	Диаметр трубки см		
	1,8	3,8	5,6
1,0	1,9	1,5	0,9
1,3	3,3	2,5	1,3
2,0	4,1	3,2	1,9

Значения $\Delta P \cdot 10^3$ в мм рт. ст.
для водорода

Таблица 5

j $\frac{\text{ма}}{\text{см}^2}$	P мм рт. ст.	Диаметр трубки см		
		1,8	3,8	5,6
1,0		3,1	2,4	1,6
1,5	2,5	3,8	3,9	2,2
2,0		4,7	3,7	2,7
1,0		1,3	1,0	0,5
1,5	7,5	1,9	1,4	0,8
2,0		2,5	1,8	1,3

Из приведенных таблиц видно, что, при постоянной средней плотности разрядного тока, увеличение диаметра разрядной трубки во всех случаях сопровождается уменьшением разности давлений нейтрального газа между катодом и анодом. Эти результаты также подтверждают правильность предположения о создании разности давлений газа положительными ионами. Привести количественную оценку этого эффекта почти невозможно, так как до сих пор недостаточно изучена поперечная зависимость плотности разрядного тока. Известно только, что плотность разрядного тока не постоянна по направлению радиуса трубы.

Расчеты, приведенные в работе [1], выполнены без учета радиальной зависимости плотности разрядного тока из-за непреодолимых математических трудностей. Это допустимо, так как порядок величины q не зависит от диаметра разрядной трубки.

В дальнейшем все наши рассуждения будут относиться к среднему диаметру разрядной трубки.

Таблицы 1, 2 и 3 дают величину q всегда большую единицы, даже если считать, что допущена ошибка порядка 25%. Это означает, что во всех случаях число ионов, идущих на катод из тлеющего свечения, больше, чем число ионов, идущих на катод из области катодного падения потенциала. К сожалению с нормальным разрядом измерение провести не удалось из-за малости разности давлений нейтрального газа.

Вероятно, что при нормальном разряде большая часть идущих на катод ионов образуется в области катодного падения потенциала. Иначе невозможно было бы понять механизм нормального разряда. Но уже при напряжениях незначительно больших нормального, число

ионов, идущих из тлеющего свечения на катод, возрастает по сравнению с числом ионов, поступающих из области катодного падения потенциала.

Средняя длина $\bar{S}_k$ должна расти пропорционально напряжению катода, так как чем больше напряжение, тем больше ускоряются электроны и тем дальше создают они ионы. С другой стороны, при увеличении напряжения уменьшается ширина области катодного падения потенциала. По этим двум причинам нужно было бы ожидать возрастания величины q с ростом напряжения, так как $q = \bar{S}_k/d$. Это было бы верно, если бы в местах образования ионов не было процессов потерь ионов, как это, в весьма значительной мере, имеет место в тлеющем свечении. Следовательно, без анализа поведения ионов в тлеющем свечении, нельзя утверждать, что величина q пропорциональна напряжению катода.

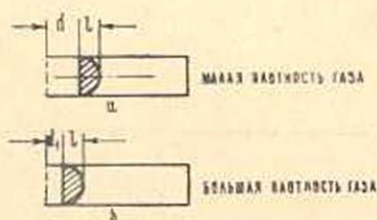
Средняя длина $\bar{S}_k$ определяется шириной слоя тлеющего свечения эмитирующего ионы, причем длина l растет с ростом ширины этого слоя.

Ширина слоя эмитирующего ионы и их количество сильно зависят от процессов потери ионов. Если бы не было потерь ионов, то все возникающие ионы доходили бы до катода. Однако, существует два известных процесса, которые приводят к потерям ионов: диффузия ионов на стенки и объемная рекомбинация их.

В зависимости от рода газа, потери определяются в основном одним из двух процессов.

Рассмотрим первый случай, случай с инертным газом. В инертных газах объемная рекомбинация незначительна, поэтому в этом случае потеря ионов идет, в основном, путем их диффузии на стенку разрядного объема.

Ширина слоя l (фиг. 4) тлеющего свечения эмитирующего ионы в область катодного падения потенциала (а значит и доходящих до катода), определяется только геометрической формой разрядного сосуда. Поэтому из областей, находящихся за указанной областью l ,



Фиг. 4.

ионы не могут попасть в область катодного падения потенциала. Вероятность диффузии их на стенку разрядного промежутка вне слоя l больше, чем вероятность диффузии их в область катодного падения потенциала. Ширина эмитирующего слоя l порядка величины радиуса разрядной трубки. Так как ширина l не зависит от давления газа (фиг. 4 а и в), а ширина области катодного падения потенциала d уменьшается с увеличением давления, то величина q растет (правда, незначительно) с возрастанием давления.

Что касается средней длины $\bar{S}_k$, то она должна с ростом давления очень незначительно уменьшаться, так как d уменьшается, а l — нет, затем d намного меньше l . Точно такой результат получен в аргоне (см. таблицу 1). Вероятно это правильно во всех случаях, когда отсутствует объемная рекомбинация. Если инертный газ не чистый (вследствие чего появляется объемная рекомбинация), то в этом случае не вся ширина l участвует в эмиссии ионов, доходящих до катода. Следовательно, незначительная примесь другого газа, приводящего к появлению объемной рекомбинации ионов, резко меняет вольтамперную характеристику разряда в инертных газах.

Во втором случае, когда газ молекулярный (H_2 , N_2) и поэтому существует объемная рекомбинация, поведение слоя l меняется.

При не очень маленьких плотностях плазмы тлеющего свечения, объемная рекомбинация становится настолько значительной, что вероятность рекомбинации ионов на стенку путем их диффузии становится пренебрежимо малой относительно вероятности объемной их рекомбинации. По этой же причине уменьшается диффузия ионов в область катодного падения потенциала.

Отсюда следует, что чем больше рекомбинация, тем меньше ширина слоя плазмы из которой ионы диффундируют в область катодного падения потенциала.

Объемная рекомбинация ионов растет с увеличением давления газа, вследствие этого ширина слоя l уменьшается. С ростом давления рекомбинация растет вследствие следующих причин:

1) коэффициент рекомбинации пропорционален минимум первой степени давления газа*,

2) известно, что с ростом давления P , при постоянной плотности разрядного тока вследствие уменьшения диффузии ионов, плотность плазмы увеличивается пропорционально P^2 , так как концентрация положительных (а также отрицательных) частиц увеличивается пропорционально первой степени давления газа.

Таким образом, рекомбинация заряженных частиц, примерно, пропорциональна не менее третьей степени давления. В действительности эта связь намного сложнее, так как при увеличении давления газа меняется, например, температура заряженных частиц. Отсюда видно, что ширина слоя l не только зависит от того, как глубоко в плазме генерируются ионы, но также зависит от величины диффузии и рекомбинации ионов. Поэтому увеличение напряжения (т. е. увеличение глубины ионогенерации в плазме) не приводит к увеличению q (или $\bar{S}_k$), как это следовало ожидать без учета потерь ионов.

* Первой степени, если рекомбинация идет между электронами и положительными ионами, при столкновении с нейтральной молекулой. Большая часть рекомбинаций, однако, идет путем соединения положительных и отрицательных ионов, поэтому коэффициент рекомбинации растет с давлением p больше, чем p в первой степени.

Так как в молекулярных газах рекомбинация растет пропорционально не менее третьей степени давления газа (вследствие чего уменьшается ширина слоя l), а ширина области катодного падения потенциала уменьшается пропорционально первой степени давления, то отсюда следует, что с увеличением давления газа как q , так и средняя длина пути $\bar{S}_k$ ионов, доходящих до катода, уменьшаются. Аналогичная картина наблюдается при разряде в азоте и водороде (см. табл. 2 и 3).

Приведенные выше рассуждения относительно изменения l в зависимости от рода газа можно получить из уравнения для тлеющего свечения, написанного для случая плазмы в цилиндрической трубке.

Таким образом, результаты, полученные относительно места возникновения ионов, объясняются качественно правильно и показывают, что уже при слабо аномальном тлеющем разряде большинство ионов идет на катод из области тлеющего свечения, и что характер разряда существенно зависит от рода газа — инертности и молекулярности.

Физический институт
АН Армянской ССР

Поступила 2 IX 1959

2. Մ. Ռեզիկյան

ԻՈՆՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՑՈՒՄԸ ՄԱՐՄԱՆԴ ԴԱՏՈՂԱՅԻՆ ՄԱՍԻՄ

(էքսպերիմենտալ մաս)

Ա Ս Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

էքսպերիմենտալ կերպով ուսումնասիրված է իոնների առաջացման տեղը մարմանը պարպման կատոդի շերտում՝ կախված նրա պարպման պայմաններից: Իոնների առաջացման տեղը որոշված է կատոդի և անոդի միջև ճնշումների տարբերությունը չափելու միջոցով, որը թույլ է տալիս բնութագրել q մեծությունը:

$$q = \frac{\bar{S}_k}{d},$$

որտեղ $\bar{S}_k$ -ն դեպի կատոդ եկող իոնների ճանապարհի միջին երկարությունն է, իսկ d -ն կատոդային անոդի շերտի հաստությունն է:

Չափումները կատարված են իներտ (արգոն) և մոլեկուլյար (ջրածին և ազոտ) գազերում: Ստացված է, որ նույնիսկ թույլ անոդալ մարմանը պարպումների դեպքում q -ն մեծ է մեկից: Այդ նշանակում է, որ իոնների մեծ մասը գալիս է կատոդ մարմանը լուսավորման շերտից, ընդ որում q -ի փոփոխությունը, նախած գազի ճնշմանը, իներտ և մոլեկուլյար գազերի մեջ որակապես տարբեր է: Այս տարբերությունը բացատրվում է նրանով, որ իներտ գազերում զգալի դեր է խաղում մարմանը լուսավորման շերտից իոնների զիջվածիան դեպի խողովակի պատերը, իսկ մոլեկուլյար գազերի դեպքում՝ այդ իոնների տարածական չեզոքացումը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Резикян А. М. Ионнообразование в катодной части тлеющего разряда. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук*, 13, № 6, 1960.