

## ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ РАЗРЯДА В ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая

Исследовалась зависимость потенциала зажигания и времени затягивания зажигания от параметров и начальных условий в разряде в высоком вакууме ( $10^{-5}$  —  $10^{-8}$  мм рт. ст.). Эксперименты производились с трубкой, помещенной в однородное магнитное поле. Обнаружено затягивание зажигания, которое при определенных условиях может достигать нескольких минут. Для объяснения ряда зависимостей потенциала зажигания и времени затягивания от параметров разряда привлечен теоретический расчет кинетики электронов.

В работе [1] нами был проведен теоретический анализ движения электронов в разряде в однородном магнитном поле при низких давлениях в специальном случае неоднородного электрического поля вида

$$\varphi = V_0 + \frac{V_a - V_0}{r_a^2} r^2 - \frac{V_a - V_0}{d^2} z^2.$$

Здесь  $\varphi = \varphi(r, z)$  — потенциал электрического поля в точке  $(r, z)$ ,  $V_0 = \varphi(0, 0)$  — потенциал в центре трубки,  $V_a$  — потенциал анода,  $r_a$  — радиус анода,  $d$  — расстояние между катодом и анодом.

Было показано, что при  $H \leq H_{кр}$  электроны могут уйти на анод без соударения в объеме. В случае  $H > H_{кр}$  электроны движутся по спирали, совершая одновременно гармонические колебания около анода. Соударяясь с молекулами газа, электрон постепенно приближается к поверхности анода. При дальнейшем увеличении магнитного поля уменьшается амплитуда колебаний электронов по радиусу, колебания происходят на меньшем расстоянии от оси, и частота колебаний электронов в радиальной плоскости возрастает. Основную роль в ионизации газа играют электроны, колеблющиеся вдоль оси  $z$  и имеющие в конце свободного пробега энергию, достаточную для ионизации. При больших значениях  $H$  вероятность ионизации электронами, образующимися в плоскости анода, уменьшается, так как энергия, набираемая ими при движении, перпендикулярном к  $H$ , недостаточна для ионизации.

В настоящей статье используется указанный расчет кинетики электронов для объяснения механизма установления разряда, в частности, для объяснения экспериментально полученных зависимостей потенциала зажигания и времени затягивания от различных параметров.

Электрическое поле указанного вида создавалось кольцевым анодом и двумя холодными катодами-дисками, расположенными симметрично по обе стороны от анода (рис. 1, а). Напряжение на электроды подавалось с выпрямителя или с высоковольтной рентгеновской установки РУП—2.

Экспериментально полученная зависимость потенциала зажига-

ния\* от магнитного поля изображена на рис. 1, б. При значениях  $H < H_{кр}$  зажигания нет, что согласуется с выводами из теоретического расчета средней длины свободного пути осциллирующих электронов. Увеличение напряженности магнитного поля затрудняет уход электронов на анод и стенки трубки и увеличивает ионизацию электронами, как колеблющимися между плоскостями катодов, так

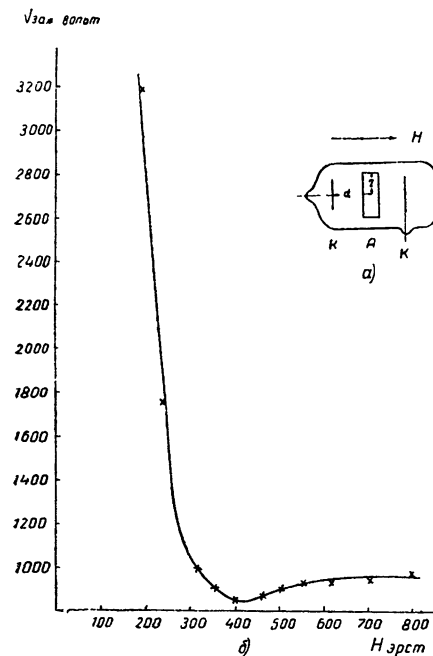


Рис. 1. а — Схема разрядной трубки. б — Зависимость потенциала зажигания от магнитного поля.  $p = 6,5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. Воздух.

и вращающимися в плоскости анода, в результате чего потенциал зажигания сильно падает. Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля ведет к уменьшению ионизации электронами, вращающимися в плоскости анода, вследствие значительного сокращения амплитуды колебаний в радиальном направлении и уменьшения энергии, набираемой этими электронами при движении по радиусу. Потенциал зажигания несколько повышается, но так как ионизация, как показано ранее [1], в основном производится электронами, колеблющимися вдоль оси, это изменение незначительно (10–20%).

В обычных условиях (при давлениях, для которых длина свободного пробега больше линейных размеров разрядного промежутка при постоянном электрическом поле и  $H=0$ ) длительность запаздывания зажигания практически равна бесконечности, так как отсутствуют условия для развития лавины. В наших условиях развитие лавины при столь низких давлениях становится возможным благодаря двум основным факторам: 1) удержанию магнитным полем электрона в объеме до наступления соударения и 2) изменению длины свободного пробега за счет выделения газа из электродов и стенок трубки. При низких давлениях благодаря наличию повторно соударяющихся осциллирующих электронов выделение даже малых количеств газа приближает условия в разряде к условиям, необходимым для возникновения самостоятельного разряда. То есть в данном разряде даже при низком анодном напряжении потенциал зажигания может приблизиться к анодному напряжению из-за малых изменений условий в промежутке. При этом для возникновения пробоя необходимо достаточное время, которое мы назовем временем затягивания зажигания. Последнее в определенных условиях достигает нескольких десятков минут. Такая большая длительность затягивания не позволяет отнести его к обычному времени формирования разряда; удовлетворительная повторяемость (средняя ошибка наблюдений 10%) говорит о том, что наблюдаемое затягивание не является статистическим.

Большие длительности затягивания зажигания разряда в фотоэлементе (несколько десятков секунд) наблюдались Пеннингом [2]. Однако условия в опытах Пеннинга отличались от наших (более

\* Под потенциалом зажигания здесь понимается потенциал, при котором пробой разрядного промежутка наступает с запаздыванием длительностью не более сотых долей секунды.

высокое давление, равное 0,1 мм рт. ст., отсутствие магнитного поля, наличие фотоэмитирующего слоя), поэтому данное им объяснение столь значительных затягиваний зажигания не может быть использовано в нашем случае.

Наблюдение времени затягивания проводилось как в отпаянных трубках, так и в трубках, соединенных с диффузионным насосом. Изменение давления непрерывно контролировалось ионизационным манометром, помещенным в боковом отростке на расстоянии  $\sim 50$  см от разрядной трубки.

В процессе зажигания наблюдается следующее. После наложения напряжения в разряде возникает слабый ток (сотые доли мка, таунсендовский разряд), который медленно возрастает (рис. 2);

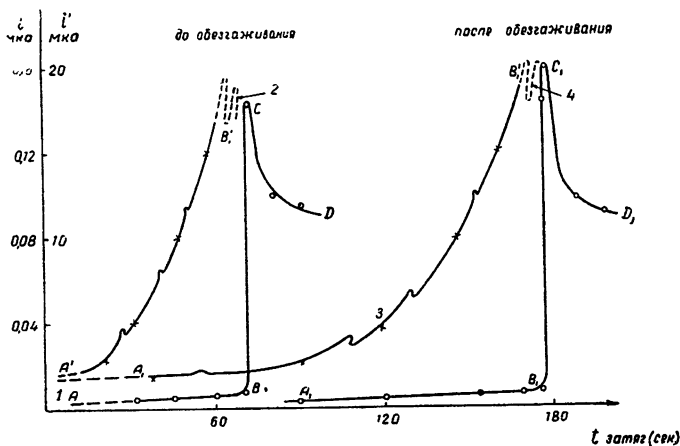


Рис. 2. Изменение разрядного тока со временем при зажигании разряда:

$V_a = 750$  в,  $H = 425$  эрст,  $p_{\text{нач}} = 9 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. —\*—\*— шкала  $i'$ —для кривой  $A'B'$ , соответствующей участку  $AB$  кривой  $ABCD$ , —o—o— шкала  $i'$ —для кривой  $A_1B_1C_1D_1$ , соответствующей участку  $A_1B_1$  кривой  $A_1B_1C_1D_1$ .  
1—колебания около нуля; 2—скачок до 17 мка; 3—небольшие колебания; 4—скачок до 20 мка.

при достижении некоторого значения ток падает, затем вновь нарастает до большего значения и т. д. Такое скачкообразное увеличение тока длится до тех пор, пока при некотором достаточно большом значении тока не наступает резкое увеличение последнего, который тотчас спадает, но сохраняет относительно большое значение (несколько мка). В дальнейшем ток медленно уменьшается. За время затягивания принимается время от момента наложения напряжения до последнего скачка тока. В зависимости от выбранных условий ( $p$ ,  $V_a$ ,  $H$  и предыстории разряда) время затягивания зажигания весьма различно и меняется от долей секунд до нескольких десятков минут. Большие времена затягивания объясняются малой объемной ионизацией при низких давлениях, малым значением коэффициента вторичной эмиссии электронов (0,01—0,1) и малым начальным током.

При обсуждении изменения тока со временем в нашем случае следует учитывать указанную выше характерную особенность данного разряда—поглощение газа катодами и стенками в горящем разряде [3] и последующее его выделение при погасании разряда и, отчасти, за счет бомбардировки ионами. Можно ожидать, что поверхностные процессы (выделение газа) будут всегда влиять на процессы зажигания при очень низких давлениях и будут особенно эффективны в исследуемом нами типе разряда при наличии магнитного поля. Ступенчатое нарастание тока связано с выделением

газа стенками трубки и увеличивающейся (при переходе разряда из нормального в аномальный) действующей поверхностью катода с последующим поглощением части газа в разряде. Повышение давления газа около катода приводит к увеличению ионизации в объеме и одновременно к росту числа вторичных электронов, освобожденных из катода; поэтому ток, несмотря на ступенчатый характер изменения, растет. Выделение газа из электродов и стенок приводит к тому, что давление в трубке достигает значения, при котором приложенное к электродам напряжение становится достаточным для зажигания самостоятельного разряда при данной величине магнитного поля. Это наступает в момент последнего всплеска тока. При этом наблюдается также резкое повышение давления (примерно в 2 раза). Быстрое падение тока после скачка можно объяснить на основе теории Штеенбека [4], рассматривающей изменение тока в момент пробоя при наличии аномального катодного падения. Дальнейшее медленное уменьшение тока во времени связано с поглощением газа катодами и стенками.

Можно ожидать, что выделение газа из катода действует более эффективно, чем выделение газа из стенок. Роль освобождаемого из катодов газа подтверждается опытами по измерению времени затягивания при предварительном обезгаживании катода ионной бомбардировкой и без него (см. табл. 1).

Таблица 1

$V_a$ (в)	$H$ (эрт)	$p$ начальное мм рт. ст.	$t$ затягивания после обезгаживания	$t$ затягивания без обезгаживания
850	550	$3,5 \cdot 10^{-6}$	3 мин 42 сек	3 сек
850	550	$3,0 \cdot 10^{-6}$	8 мин 57 сек	52 сек
850	550	$2,0 \cdot 10^{-6}$	14 мин 15 сек	62 сек

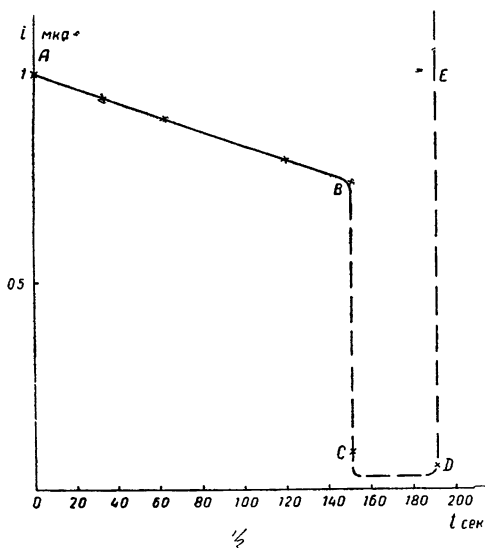


Рис. 3. Изменение тока со временем:

Область ABC — поглощение газа в разряде; область CDE — выделение газа в разряде; А —  $p = 4 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст.; В —  $p = 1 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст.; D —  $p = 3 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.; DE — скачок тока до 3 мкА;  $V_a = 2600$  в,  $H = 630$  эрт.

Вышесказанное подтверждается также опытами, проведенными при очень низких давлениях  $\sim 10^{-6}$  мм рт. ст. в отпаянной трубке при  $V_a = 2000 \div 3000$  в,  $H = 500 \div 900$  эрт. Когда давление в системе уменьшалось до  $\sim 10^{-8}$  мм рт. ст., ток скачком падал до десятых или сотых долей мкА, затем наблюдалось медленное уменьшение тока до  $0,01 \div 0,02$  мкА. Через несколько десятков секунд, вследствие изменения давления за счет натекания до  $\sim 10^{-7}$  мм рт. ст., ток вновь скачком увеличивался до нескольких мкА, после чего процесс периодически повторялся. Одна из кривых приведена на рис. 3.

Рассматривая зажигание разряда при столь низких давлениях, нельзя не учитывать роли потенциала стенки. Наблю-

дения, проведенные в электролитической ванне, показали, что изменение потенциала стенки ведет к перераспределению потенциала в объеме. Потенциал в центре трубки  $V_0$  при увеличении напряжения на стенке возрастает. Как показано в работе [1], это приводит к изменению частоты колебаний электронов и их энергии. Кроме того, изменение потенциала стенки влияет на поглощение ею ионов. Для выяснения роли стенки на покрытую тонким полупроводящим слоем металла стеклянную стенку подавался различный потенциал относительно катода. Результаты измерения времени затягивания в зависимости от потенциала стенки представлены в таблице 2, из которой видно уменьшение времени затягивания с увеличением положительного напряжения стенки относительно катода.

Таблица 2

$V_a = 750$ в $H = 500$ эрст		$p$ начальное = $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
Потенциал стенки относительно катода (в)	время затягивания	
0	2 мин 21 сек	
500	1 мин 50 сек	
700	1 мин 30 сек	
стенка свободна	1 мин 56 сек	

Приведенные цифры представляют средние данные по значительному числу измерений.

Рассмотренные результаты подтверждают, что основную роль в ионизации газа играют электроны, колеблющиеся около плоскости анода. Изменение энергии и частоты колебаний последних отражается на времени затягивания зажигания. Роль ионов менее существенна, так как мала их концентрация и мал коэффициент вторичной эмиссии.

Зависимости времени затягивания от  $H$  для различных условий представлены на рис. 4 и могут быть объяснены аналогично кривой

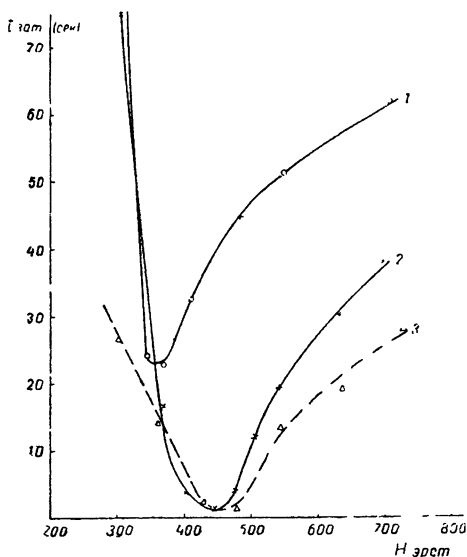


Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость времени затягивания от магнитного поля:

1 -  $V_a = 850$  в,  $p = 2,3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.; 2 -  $V_a = 900$  в,  $p = 2,3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.; 3 -  $V_a = 950$  в,  $p = 2,4 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

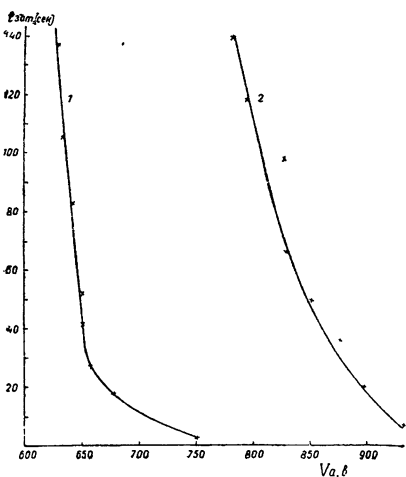


Рис. 5.

Рис. 5. Ход кривой  $t_{заг} = f(V)$  при  $H = 500$  эрст:

1 -  $p = 5,5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.; 2 -  $p = 2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

$V_{\text{зак}} = f(H)$  на основании рассмотрения кинетики электронов. С ростом приложенного напряжения минимум кривой смещается в сторону больших магнитных полей, так как параллельно с увеличением приложенного напряжения необходимо увеличивать  $H$  для получения максимума ионизации.

На рис. 5 представлены кривые зависимости времени затягивания ( $t_{\text{зат}}$ ) от  $V_a$  для различных начальных давлений. При малых  $V_a$  ионизация колеблющимися электронами будет производиться преимущественно вблизи плоскости анода (максимум функции ионизации). С ростом  $V_a$  область ионизации расширяется в сторону катода, время затягивания падает.

Итак, полученные зависимости потенциала зажигания и времени затягивания от различных параметров разряда подтверждают правильность выводов о кинетике электронов, сделанных из ранее проведенного теоретического рассмотрения.

Проведенные эксперименты могут представить практический интерес, так как выявляют условия, ведущие к возникновению пробоя в электронных приборах в высоком вакууме.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. В. Смирницкая и Э. М. Рейхрудель, Радиотехника и электроника, 1957, 2, 10, 1303.
2. F. M. Penning, Physica, 1936, 3, 6, 563.
3. Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая, А. И. Борисенко, Радиотехника и электроника, 1956, 1, 2, 253.
4. M. Steenbeck, Zs. f. techn. Phys., 1929, 10, 11, 480

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
24 декабря 1957 г.