

УДК620.179.1:621.385.64

В.К. Базылев, А.М. Жидков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ОТПАЯННОМ МАГНЕТРОНЕ С ПРЯМОНАКАЛЬНЫМ КАТОДОМ

Проведён анализ возможных способов измерения давления остаточных газов в отпаянном магнетроне с прямонакальным катодом. Экспериментально доказана возможность измерения давления в отпаянных магнетронах с прямонакальным катодом способом, основанным на рассеянии электронов молекулами газа в ортогонально скрещенных электрическом и магнитном полях при индукции магнитного поля большей критической в диапазоне 10^{-3} - 10^{-6} мм рт.ст. Показано, что зависимость измеряемого информативного параметра от давления близка к линейной.

Ключевые слова: магнетрон, отпаянный электровакуумный прибор, рассеяние электронов, измерение давления остаточного газа, магнитная индукция, скрещенные электрические и магнитные поля.

Введение. Измерение давления в отпаянных электровакуумных приборах производится с целью контроля герметичности их оболочек. Нагревание атмосферного воздуха в объём прибора приводит к выходу его из строя. В электровакуумных приборах массового выпуска измерение давления осуществляют с помощью собственной электродной системы прибора. Величину течи в оболочке прибора определяют, измеряя давление в нём до и после опрессовки в специальной камере в течение суток в среде инертного газа при давлении выше атмосферного [1]. Для определения течи необходимо измерять давление газа в диапазоне 10^{-7} – 10^{-3} мм рт.ст. В настоящей работе анализировались различные способы измерения давления остаточных газов в приборах диодной конструкции с целью определения возможности использования их для измерения давления в отпаянных магнетронах с накалённым катодом. Экспериментально исследована возможность измерения давления в отпаянном магнетроне с прямонакальным катодом способом, основанным на рассеянии электронов молекулами газа в ортогонально скрещенных электрическом и магнитном полях, при индукции магнитного поля большей критической [2].

Цель работы – показать возможность измерения давления газа в отпаянных магнетронах с накалённым катодом методом, основанным на рассеянии электронов молекулами.

Теоретическая часть. Магнетрон с прямонакальным катодом является прибором диодной конструкции. Для измерения давления газа соб-

ственной электродной системой в таких приборах разработан ряд методов [3 – 6].

Известен способ измерения давления газа в диодах с накалённым катодом, основанный на ускорении электронов, ионизирующих газ, между витками катода переменным напряжением [3]. Образующиеся ионы собираются анодом, находящимся под отрицательным потенциалом относительно катода. Ионный ток пропорционален давлению газа в диоде. Для исключения попадания электронов на анод величина постоянного смещения анода выбирается большей амплитуды переменного напряжения между выводами катода.

Рабочее напряжение накала катода исследуемого магнетрона составляет 6,3 В. Это намного меньше потенциала ионизации остаточного газа (15,6 В для азота). Для эффективной ионизации молекул газа требуется напряжение порядка двухсот вольт между ближайшими витками катода. Поскольку катод магнетрона содержит 10 витков, то к нему надо приложить напряжение порядка 2 кВ. Сопротивление ненагретого катода магнетрона составляло 0,1 Ом, а сопротивление нагретого катода составляет величину порядка 1 Ом. Для импульсного нагрева катода потребуется импульсный ток величиной порядка нескольких килоампер. Это неприемлемо из-за сложности коммутации тока такой величины.

Рассмотрим возможность использования высокочастотного напряжения амплитудой 2 кВ для питания накала катода. Для этого необ-

ходимо, чтобы катод и последовательно с ним включенный конденсатор образовывали последовательный контур, настроенный на резонансную частоту. Индуктивность катода составляла величину порядка 0,15 мкГн. Расчёт показывает, что при ёмкости конденсатора последовательного контура порядка 50 пФ, резонансная частота должна быть порядка 56 МГц. Добротность последовательного контура при активном сопротивлении катода в 1 Ом составляет 45. Поэтому потребуется генератор переменного напряжения с амплитудой примерно 50 В.

Применение высокочастотного напряжения с частотой в десятки мегагерц и амплитудой 2 кВ существенно усложняет эксплуатацию такого вакуумметрического устройства. Поэтому использование такого способа измерения давления в данном магнетроне нецелесообразно.

Рассмотрим возможность использования для магнетрона с прямонакальным катодом способ измерения вакуума в диоде, основанный на инерционных свойствах электрона [4]. Сущность метода заключается в том, что используется электрический режим, при котором электроны, вылетающие из катода, при движении к аноду производят ионизацию газа и, не достигая анода, возвращаются на катод. В цепи анода протекает ионный ток, пропорциональный давлению газа. Для реализации такого режима между анодом и катодом прикладывается высокочастотное напряжение и постоянное смещение отрицательной полярности. При определённом соотношении между величинами, такими как постоянное смещение U_0 , межэлектродное расстояние d , амплитуда U_m и круговая частота ω переменного напряжения в диоде можно обеспечить движение электронов со скоростью, достаточной для ионизации молекул газа, и в то же время исключить попадание электронов на анод. Для этого необходимо выполнение условий

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} \geq CeU_i, \quad (1)$$

$$X_{\max} \leq d, \quad (2)$$

где V_{\max} и X_{\max} – максимальные значения скорости и координаты электрона соответственно, C – множитель, превышающий единицу, U_i – потенциал ионизации молекул газа.

Для диодов с межэлектродным расстоянием около 10 мм частота выбирается в пределах 100-120 МГц при амплитуде в несколько сотен вольт. В рассматриваемом магнетроне межэлектродное расстояние составляет 2 мм. Расчёт показал, что в этом случае частота переменного напряжения должна быть порядка 500 МГц.

Применение высокочастотного напряжения с частотой в сотни мегагерц и амплитудой сотни вольт также существенно усложняет эксплуатацию такого вакуумметрического устройства. Поэтому использование такого способа измерения давления в данном магнетроне нецелесообразно.

В работе [4] описан способ измерения давления газа в диодных электронно-оптических преобразователях, основанный на явлении одноэлектронного вторично-электронного резонансного разряда. Сущность данного способа заключается в следующем, между внешним электродом, соприкасающимся с центральной частью входного окна ЭОПа, и кольцевым выводом катода прикладывается переменное напряжение, а на анод подаётся отрицательное смещение. Электроны, выходящие из катода в положительную полуволну высокочастотного напряжения, ионизируют молекулы газа и возвращаются обратно на катод в начало положительной полуволны высокочастотного напряжения, выбивая вторичные электроны. Коэффициент вторичной эмиссии материала катода ЭОПа больше единицы. Поэтому при возникновении вторично-электронного разряда существенно увеличивается ионизирующий электронный ток. Образующиеся положительные ионы собираются на аноде. Величина ионного тока пропорциональна давлению газа.

Конструкция магнетрона существенно отличается от конструкции ЭОПа. В магнетроне нельзя использовать дополнительный электрод и создать распределение электрического поля, обеспечивающее возбуждение одноэлектродного вторично-электронного резонансного разряда. Кроме этого, коэффициент вторичной эмиссии вольфрамового катода меньше единицы, что исключает возможность вторично-электронного резонансного разряда. Поэтому данный способ не пригоден для использования в применении к магнетрону с прямонакальным катодом.

Рассмотрим возможность использования высокочастотного компенсационного способа измерения давления газа для магнетрона с прямонакальным катодом. Сущность способа заключается в периодическом накоплении положительных ионов в квазиэлектростатической потенциальной яме объёмного заряда электронов [5]. Потенциальная яма для положительных ионов образуется при приложении между анодом и катодом переменного напряжения с периодом много большим времени пролёта ионом межэлектродного промежутка, если анодный ток в положительный полупериод ограничен пространственным зарядом. Накопление ионов приводит к компенсации пространственного заряда

электронов и росту электронного тока. Периодическое удаление накопленных ионов из потенциальной ямы путём подачи импульса напряжения в цепь катода вызывает уменьшение электронного тока и последующий его рост после окончания импульса по мере накопления ионов в потенциальной яме. Мерой давления служит скорость нарастания электронного тока. Чем выше давление газа, тем больше скорость нарастания электронного тока [6].

Особенностью использования данного способа измерения давления в применении к магнетрону с прямонакальным катодом является то, что напряжение накала деформирует потенциальную яму. Глубину потенциальной ямы можно оценить по следующей формуле

$$U_{do} = -\frac{0.1 \cdot U_m}{\pi}, \quad (3)$$

где U_m – амплитуда напряжения на аноде.

Если величина напряжения накала превышает глубину потенциальной ямы, то это приведёт к невозможности накопления в ней ионов и, следовательно, способ не будет работать. В магнетроне с межэлектродным расстоянием 2 мм при величине напряжения 50 В требуется частота анодного напряжения порядка 12 МГц. При этом глубина квазиэлектростатической потенциальной ямы составит 1,5 В, что существенно меньше напряжения накала катода 6,3 В.

Реализация метода в принципе возможна, если питание накала катода сделать импульсным, а измерение скорости накопления ионов в потенциальной яме проводить в паузе между импульсами тока накала катода, когда отсутствует деформация потенциальной ямы. Однако это потребует значительного усложнения измерительного устройства. Кроме этого, для применения данного способа измерения давления в магнетроне необходимо снимать магнитную систему с прибора, что не всегда желательно.

Другой возможный способ измерения давления в магнетроне с прямонакальным катодом основан на рассеянии электронов молекулами газа в ортогонально скрещённых электрическом и магнитном полях при индукции магнитного поля больше критической. Сущность метода заключается в следующем. Между анодом и катодом прикладывается переменное напряжение в форме меандра. В положительный полупериод напряжения электроны, эмитируемые с катода, движутся вокруг него по эпициклоидальным траекториям (рисунок 1). В отрицательный полупериод электроны из межэлектродного объёма удаляются вдоль силовых линий магнитного поля на торцевые части катода. В положительный

полупериод меандра электроны перемещаются к аноду за счёт рассеяния на молекулах газа. Время пролёта электронов до анода зависит от давления газа. Например, с ростом давления увеличивается число актов рассеяния, что уменьшает время пролёта электронов до анода. Поэтому время пролёта электронов до анода может служить мерой давления газа.

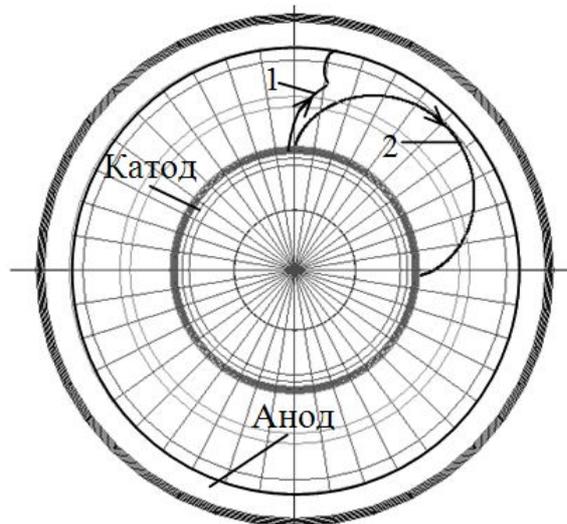


Рисунок 1 – Физические основы метода:
1 – траектория электрона при рассеянии на молекуле газа;
2 – траектория электрона, не сталкивающегося с молекулой газа

Измерение давления производится следующим образом. Вначале устанавливается частота анодного напряжения с длительностью положительного полупериода намного большей времени пролёта электронов до анода. Поскольку время пролёта электронов меньше полупериода напряжения, то в цепи анода течёт постоянная составляющая тока. Изменением напряжения накала катода устанавливается фиксированное значение постоянной составляющей тока анода. Затем частота меандра увеличивается. С ростом частоты напряжения величина постоянной составляющей тока начинает уменьшаться, поскольку не все электроны, вышедшие с катода, успевают за положительный полупериод меандра достичь анода. В результате с ростом частоты происходит уменьшение постоянной составляющей анодного тока. Когда длительность положительного полупериода становится равной удвоенному времени пролёта, то постоянная составляющая уменьшается вдвое по сравнению с установленным значением на низкой частоте. Таким образом измеряется время пролёта, зависящее от давления газа. Время пролёта обратно пропорционально давлению газа. Более удобно за меру давления принимать частоту анодного напряже-

ния, при котором происходит уменьшение анодного тока в два раза, по сравнению со значением на низкой частоте, поскольку эта частота пропорциональна давлению газа.

Вследствие падения напряжения вдоль тела катода часть электронов, эмитируемых катодом, будет ускоряться в направлении одной из торцевых частей катода. Это может недопустимо снизить чувствительность метода измерения давления. Поэтому необходимо экспериментально определить допустимый диапазон тока накала и постоянной составляющей тока анода на частоте, на которой начинается измерение. Кроме этого, как показано в [7], при наличии неортогональности векторов электрического и магнитного полей может присутствовать компонента анодного тока, не обусловленная рассеянием электронов на молекулах. Проведённый в этой работе анализ возможных механизмов протекания тока в манометрическом преобразователе, не связанного с рассеянием электронов на молекулах газа, показал, что наличие такой компоненты будет определять нижний предел измеряемого давления. Поэтому было необходимо экспериментально исследовать возможность применения данного метода измерения давления в магнетроне с накаливаемым катодом.

Экспериментальные исследования. Объектом исследования служил напаянный на откатной пост магнетрон с прямонакальным катодом с межэлектродным расстоянием 2 мм и индукцией магнитного поля 0,175 Тл, создаваемой постоянными кольцевыми магнитами. Откачка производилась диффузионным и форвакуумным насосами. Давление газа в магнетроне изменялось напуском аргона через игольчатый натекаль при постоянной откачке диффузионным насосом. Давление аргона измерялось с помощью вакуумметра ВИТ-2. Для исключения перепада давления между объёмами магнетрона и манометрического преобразователя ПМИ-2 последний соединялся с анодом магнетрона патрубком длиной 80 мм и диаметром 14 мм.

Между анодом и катодом прикладывалось переменное напряжение в форме меандра амплитудой 120 В, и измерялась постоянная составляющая тока в цепи анода электрометрическим усилителем. При этом индукция магнитного поля была в 10 раз больше критической. Давление аргона в магнетроне изменялось в диапазоне ($10^{-6} - 10^{-3}$ мм рт.ст.). При каждом значении давления задавалась частота меандра, равной 2 Гц, и регулировкой тока накала катода устанавливалась постоянная составляющая тока 50 пА. Затем частота увеличивалась до значения $f_{0.5}$, при котором постоянная составляющая тока

уменьшалась вдвое до 25 пА. Это значение частоты служило мерой давления аргона в магнетроне.

На рисунке 2 представлены зависимости постоянной составляющей тока анода от частоты меандра при нескольких значениях давления аргона в диапазоне $10^{-4} - 10^{-3}$ мм рт.ст. При индукции магнитного поля большей критической попадание электронов на анод возможно только за счёт рассеяния на молекулах газа. Уменьшение постоянной составляющей тока с ростом частоты объясняется тем, что положительный полупериод меандра становится соизмерим со временем пролёта электронов до анода. В отрицательный полупериод электроны из межэлектродного промежутка уходят вдоль линий магнитного поля на торцевые части катода.

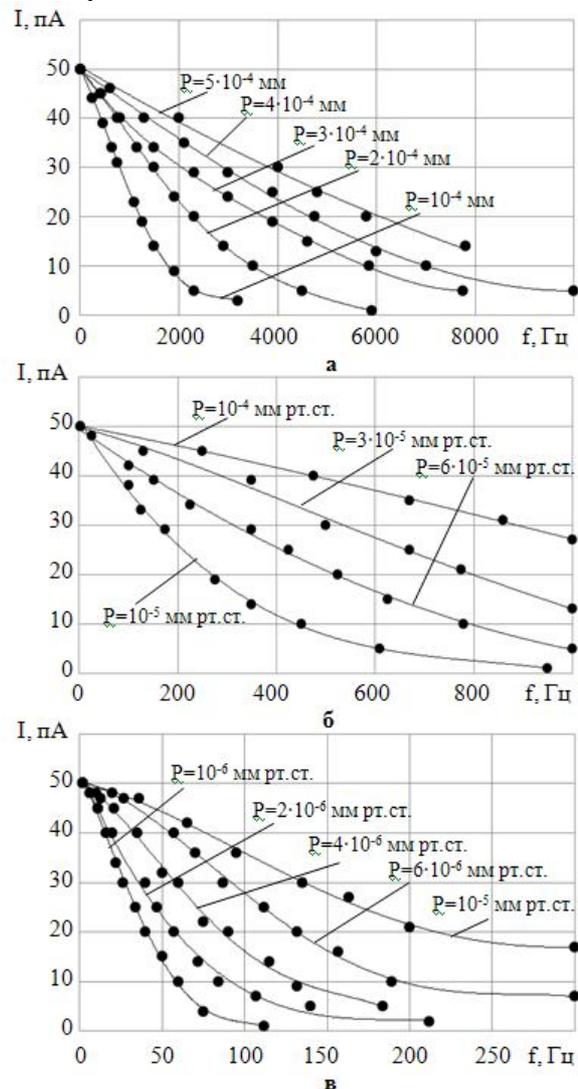


Рисунок 2 – Зависимость постоянной составляющей анодного тока от частоты в диапазоне давлений аргона: $10^{-4} - 10^{-3}$ (а), $10^{-4} - 10^{-5}$ (б) и $10^{-5} - 10^{-6}$ (в) мм рт.ст.

При длительности положительного полупериода, равной или меньшей среднему времени

пролёта электронов, постоянная составляющая тока должна быть равна нулю, поскольку электроны, не достигнув анода, в отрицательный полупериод будут уходить на торцевые части катода. С ростом давления увеличивается число актов рассеяния электронов на молекулах газа, поэтому время пролёта уменьшается, и спад постоянной составляющей тока происходит на большей частоте.

На рисунке 3 представлена зависимость частоты $f_{0,5}$, на которой происходит уменьшение постоянной составляющей тока вдвое по сравнению с её значением на частоте 2 Гц, от давления аргона в диапазоне $10^{-6} - 10^{-4}$ мм рт.ст. В диапазоне $10^{-5} - 10^{-3}$ мм рт.ст. зависимость близка к линейной. Отклонение от линейной зависимости при давлениях меньших 10^{-5} мм рт.ст. связано с протеканием тока, не зависящего от давления газа.

Измерения проводились на двух образцах магнетронов одного типа. Отклонения в ходе градуировочной зависимости не превышали 10 %.

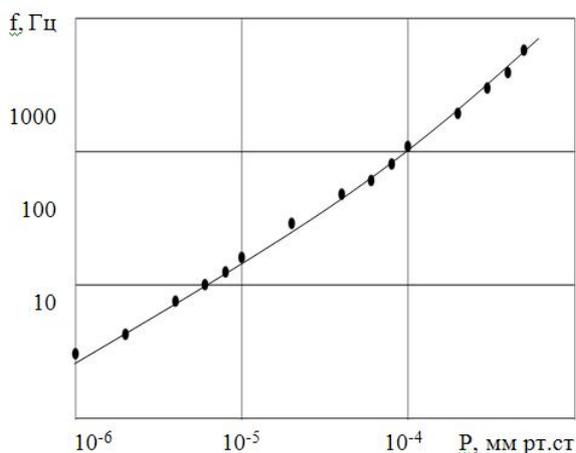


Рисунок 3 – Зависимость частоты спада от давления аргона

Заключение. Таким образом, наиболее подходящим способом измерения давления газа в отпаянном магнетроне с прямонакальным катодом является способ, основанный на рассеянии электронов молекулами остаточного газа в скрещенных электрическом и магнитных полях.

Экспериментально показана возможность измерения давления остаточных газов в диапазоне давлений $10^{-6} - 10^{-3}$ мм рт.ст. в отпаянных магнетронах с прямонакальными катодами. Достоинством данного способа является отсутствие ионизации остаточного газа, что обеспечивает исключение откачивающего действия, присущего некоторым другим способам измерения давления газа. Это, в свою очередь снижает погрешность измерения давления. Другое преимущество метода рассеяния электронов в том, что при измерении давления газа по данной методике нет необходимости в наличии катода со стабильной эмиссией.

Библиографический список

1. Коротченко В.А. Контроль герметичности приборов вакуумной и плазменной электроники // Дефектоскопия. – 1987. – № 6. – С. 41-47.
2. Базылев В.К. // Изв. РАН. Сер. Физ. – 2000. – Т. 64. – № 7. – С. 1382 – 1383.
3. Ловпаче К.Ю. Измерение вакуума в отпаянных приборах М-типа с помощью электрического газового разряда в поперечном магнитном поле. – Электронная техника, серия 1, 1972. Вып. 10, С. 82-88.
4. Коротченко В.А. Разработка основ неразрушающего контроля приборов вакуумной и плазменной электроники по параметрам межэлектродной среды: дис. д-ра техн. наук. Защищена декабрь 1990; утв. ВАК 05.05.1991 г. Рязань 1989 г.
5. Базылев В.К., Коротченко В.А., Кудинов В.Н., Пошехонов П.В. Измерение давления остаточных газов в диоде с прямонакальным катодом. – Электронная техника, серия 4, 1979. Вып. 2. С. 105-107.
6. Ашихмин А.С., Базылев В.К., Коротченко В.А. Высокочастотный компенсационный способ измерения давления в вакуумных диодах // Электронная техника. Сер. 8.М.: ЦНИИ «Электроника», 1977. – Вып. 5. – С.129 – 131.
7. Базылев В.К., Суворов Д.В., Жидков А.М., Тарабрин Д.Ю. Исследование возможных механизмов протекания тока в цилиндрическом магнетроне при индукции магнитного поля больше критической и малом уровне эмиссии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. S1. С. 44-47.