

УДК 531.782.082

ПОВЫШЕНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ОКНО ДЛЯ ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Л. Н. Орликов, Н. Л. Орликов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск

Выполнен анализ работы газодинамического окна в виде откачиваемой камеры с отверстиями диаметром 1 мм для вывода электронного пучка из вакуума (10 Па) в атмосферу. Увеличение перепада давления достигается за счет эжектирующего эффекта, возникающего при обтекании газом элемента газодинамического окна, содержащего дренажные отверстия в стенке. Приводится методика расчета площади дренажных отверстий.

Для вывода электронных пучков из вакуума в атмосферу применяются газодинамические окна [1–4] в виде камер с автономной откачкой газа и элементами с отверстиями для вывода пучка. Однако для работы таких устройств требуется большая мощность вакуумных насосов для поддержания перепада давления между источником электронов и камерой с газом (5–10 кВт на 1 мм² площади выводного отверстия) [5–7]. Возможный путь решения проблемы вывода пучков заключается в применении газоразрядных источников электронов, работающих на форвакууме [3, 4, 8], а также в использовании газодинамических эффектов для увеличения перепада давления через газодинамическое окно.

На рис. 1 приведена схема источника электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с двухступенчатым газодинамическим окном. Источник состоит из холодного алюминиевого катода и анодов, между которыми равномерно распределен ускоряющий потенциал. При давлении в источнике 1–10 Па на катод подается отрицательный потенциал (до 100 кВ). Между катодом и анодами зажигается высоковольтный тлеющий разряд.

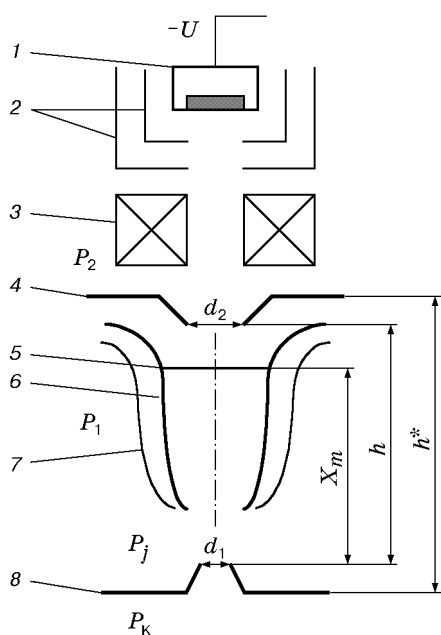


Рис. 1. Схема источника электронов с газодинамическим окном:

1 — катод; 2 — аноды; 3 — магнитная линза; 4, 8 — элементы газодинамического окна с отверстиями диаметром d_2 , d_1 соответственно; 5 — диск Маха; 6 — висячий скачок уплотнения давления; 7 — граница струи

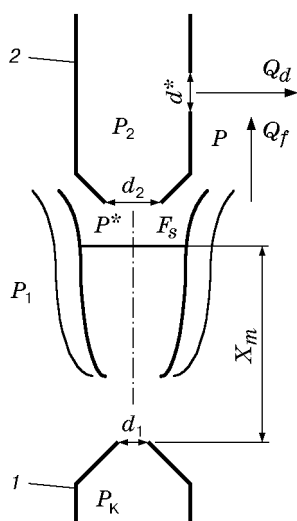


Рис. 2. Схема течения газа в газодинамическом окне с боковыми отверстиями: 1, 2 — элементы с острыми кромками

Ионы из плазмы разряда устремляются на катод. Под действием ионной бомбардировки из катода выбиваются электроны. Электронный пучок с силой тока до 100 мА фокусируется магнитной линзой в отверстиях диаметром d_2 и d_1 элементов газодинамического окна и выводится в камеру с давлением P_k . Поток газа из рабочей камеры формируется между элементами окна (в первой ступени газодинамического окна) в виде сверхзвуковой струи с диском Маха и висячим скачком уплотнения давления. Перепад давления определяется отношением давления в камере P_k к давлению во второй ступени газодинамического окна (в источнике электронов) P_2 . Для минимизации потерь электронного пучка в газе важно предельно уменьшить расстояние h между срезами элементов окна при минимальном давлении в источнике электронов. В ходе экспериментов установлено, что при использовании элементов в виде трубок с острыми кромками это условие выполняется, когда значение h равно расстоянию X_m до диска Маха. Значение X_m определяется выражением [9]

$$X_m = 0,7d_1(kP_j/P_1)^{0,5}, \quad (1)$$

где k — показатель адиабаты газа; P_j — давление на срезе отверстия истечения газа; P_1 — давление между элементами окна.

На рис. 2 представлена схема течения газа в двухступенчатом газодинамическом окне, образованном элементами с острыми кромками. Из анализа полученного в эксперименте распределения давления на поверхности элемента второй ступени окна следует, что давление торможения P^* на входе в элемент окна в 5–6 раз превышает давление P на его наружной поверхности. Боковые дренажные отверстия диаметром d^* в элементе второй ступени окна позволяют отводить часть газа из канала вывода пучка в первую ступень окна за счет разности давлений на стенках элемента. В результате перепад давления на газодинамическом окне увеличивается без увеличения производительности средств откачки.

Для практического применения данного метода необходимо определить площадь боковых отверстий, их положение и количество удаляемого газа. Анализ системы удобно проводить на основе общего уравнения эжекции [9]

$$n = \frac{1}{Na\theta^{0,5}} \frac{q(\lambda)_d}{q(\lambda)_f}, \quad (2)$$

где коэффициент эжекции $n = Q_d/Q_f$ — отношение расходов эжектируемого и эжектирующего потоков; N — перепад давления на боковом отверстии; a — геометрический параметр (отношение площади боковых отверстий F^* к площади струи, обтекающей элемент); θ — отношение температур эжектируемого и эжектирующего потоков;

$q(\lambda) = [(k+1)/2]^{1/(k-1)} \lambda [1 - (k-1)/(k+1) \lambda^2]^{1/(k-1)}$; λ — коэффициент скорости потока (отношение скорости потока к скорости звука в неподвижном газе); индексы d , f соответствуют эжектируемому и эжектирующему потокам газа.

Практические расчеты можно провести в упрощенной постановке, используя одномерную модель истечения сверхзвуковой недорасширенной струи и ее особенности взаимодействия с острым телом.

Для большинства практических устройств перепад давления на каждой ступени окна не превышает два-три порядка. В этом случае внутренний диаметр струи, определенный по диаметру диска Маха, почти в 10 раз превышает диаметр отверстия истечения d_1 [9]. При визуализации газового потока в тлеющем разряде авторами настоящей работы установлено, что при высоте элемента (расстоянии от основания до среза), большей рассчитанной по уравнению (1), и внешнем диаметре элемента, меньшем диаметра диска Маха, обтекание элемента происходит без отхода диска Маха. В этих условиях значительного изменения размеров струи за диском Маха не происходит, и в качестве площади струи вокруг боковых отверстий можно принять площадь струи на уровне диска Маха. Для элемента в виде трубки можно принять, что скорость потока газа на его внешней поверхности достигает скорости звука, а отношение температур потоков по обе стороны бокового отверстия незначительно. Следовательно, $\lambda = 1$, $q(\lambda)_f = 1$, $\theta = 1$ [9].

Зондирование потока трубкой Пито показывает, что давление торможения P^* и статическое давление на входе второй ступени окна соизмеримы: $P^* \approx P_2$, а давление на внешней боковой поверхности элемента близко к давлению P_1 между элементами: $P \approx P_1$. Таким образом, расположение боковых отверстий вблизи среза отверстия d_2 наиболее эффективно.

Уже при отношении давлений на боковой стенке $P/P^* < 0,528$ истечение газа через боковые отверстия происходит со скоростью звука. На боковом отверстии реализуется звуковой эжектор, для которого возможная степень повышения давления в режиме запирания составляет $P^*/P_1 = 3,55$ [9]. Соответственно перепад давления на боковом отверстии близок к этой величине ($N \approx P^*/P_1$).

После упрощений уравнение (2) преобразуется к виду $n = 1/(3,55a)$. Из результатов экспериментов следует, что это соотношение выполняется в газодинамических окнах с относительно высокими значениями давления в ступенях при соизмеримости площадей боковых отверстий и площади струи ($a = 1$), а также давлений эжектируемого и эжектирующего потоков. Для рассматриваемого двухступенчатого окна необходимо обеспечить минимальное давление в источнике электронов. Это может быть достигнуто при минимальных значениях n и a .

Предельно малое значение геометрического параметра может быть определено из анализа потоков при критическом течении газа через отверстия. Эжектирующий поток, формируемый вокруг элемента на входе окна, определяется соотношением, используемым в вакуумной технике [10] для вязкостного режима течения газа:

$$Q_f = 200F_1(P_k - P_1). \quad (3)$$

На входе второй ступени окна поток газа

$$Q_2 = 200F_2(P_1 - P_2) \quad (4)$$

(давления P_1 , P_2 могут быть определены отношением потока к скорости откачки [10]). Эжектируемый поток газа через боковые отверстия элемента определяется аналогично:

$$Q_d = 200F^*(P^* - P_1). \quad (5)$$

На практике последним членом в скобках в уравнениях (3)–(5) пренебрегают из-за его малости по сравнению с первым членом.