



УДК 621.380

М. Н. ДЕВЯТКОВ, Г. И. ОВЧИННИКОВА

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА ЧЕРЕЗ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЙ ПРОМЕЖУТОК С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

Рассматривается прохождение тока через межэлектродный промежуток, ток через который ограничен пространственным зарядом, в присутствии ионов остаточных газов. Экспериментально показано наличие компенсирующего действия ионов на электронный пространственный заряд, приводящего к заметной трансформации вольтамперной характеристики промежутка.

Возможность достижения высокой чувствительности реакции межэлектродного промежутка, в котором создается виртуальный катод, на изменения ряда параметров электронного потока, пронизывающего этот промежуток, позволила создать принципиально новые электронные детекторы и преобразователи СВЧ и оптического диапазонов [1—3]. Их действие основано на том, что изменение спектра скоростей электронов или граничного потенциала электронного потока приводит к изменению величины тока, проходящего через виртуальный катод. Учитывая, однако, что характеристики виртуального катода однозначно определяются состоянием электронного пространственного заряда в его окрестности, можно ожидать, что характеристики устройств, использующих свойства виртуального катода, в значительной степени должны зависеть от такого «побочного» фактора, как давление остаточных газов, т. е. от степени компенсации пространственного заряда ионами. Как показано в [4] и в более поздних исследованиях, при достаточно высокой концентрации ионов, когда она оказывается сравнимой с концентрацией электронного пространственного заряда, в промежутках с виртуальным катодом могут возникать релаксационные колебания. При более высоком вакууме имеет место частичная компенсация электронного пространственного заряда, а изменение давления сопровождается изменением величины тока, проходящего через виртуальный катод. Впервые в [5, 6] рассматривалась возможность использования режима существования виртуального катода для измерения давления остаточных газов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований влияния давления остаточных газов на вид вольтамперной характеристики межэлектродного промежутка с виртуальным катодом и предлагается методика количественной оценки, позволяющая связать изменение

давления с изменением проходящего через промежуток тока. Исследование поведения именно вольтамперных характеристик было принято нами потому, что вид этих зависимостей (их крутизна, переанс и т. п.) во многом определяет реакцию виртуального катода на различные возмущения состояния электронного потока [7].

Экспериментальные исследования проводились на макетах, состоявших из электронной пушки, формировавшей цилиндрический электронный пучок  $\varnothing 2$  мм, и межэлектродного промежутка, образованного плоской диафрагмой с сеткой и цилиндрическим стаканом-коллектором (размеры и форма электродов соответствуют данным макетов, использовавшихся в [7]). Макеты помещались в откачиваемую полость высоковакуумной установки, давление в которой с помощью ионного насоса и натекателя могло поддерживаться на любом заданном уровне от  $10^{-6}$  до  $10^{-9}$  мм рт. ст.

Типичная вольтамперная характеристика исследуемого промежутка, т. е. зависимость тока  $I_0$ , проходящего на коллектор, от потенциала коллектора  $V_2$  ( $V_1$  в дальнейшем будет обозначать потенциал первого электрода промежутка — диафрагмы) показана на рис. 1, а. Область нарастания тока соответствует значениям  $V_2$ , при которых в промежутке существует виртуальный катод. При некотором значении  $V_2$  ток  $I_0$  достигает максимальной величины и при дальнейшем увеличении  $V_2$  остается постоянным. Это значение тока коллектора соответствует величине тока, входящего в промежуток, т. е.  $I_{0\max} = I_{\text{вх}}$ .

На рис. 1, б приведена серия вольтамперных характеристик промежутка, полученная при постоянных значениях  $V_1 = 120$  в и  $I_{\text{вх}} = 9,5$  ма (плотность  $I_{\text{вх}} = 3,02 \cdot 10^{-1}$  а/см<sup>2</sup>), но при различных давлениях остаточных газов.

Увеличение давления приводит к сужению области значений  $V_2$ , при которых в межэлектродном промежутке существует виртуальный катод, возрастает крутизна во всех точках вольтамперной характеристики, а при давлении  $3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. переход от режима существования виртуального катода к полному прохождению тока начинает происходить скачкообразно. Изменение давления наиболее сильно сказывается на виде вольтамперной характеристики в режимах, близких к исчезновению виртуального катода. Кроме того, из рис. 1, б следует, что чувствительность межэлектродного промежутка к относительному изменению давления, т. е.  $\Delta I/I \cdot p/\Delta p$  (где  $\Delta I$  — изменение тока коллектора при изменении давления на  $\Delta p$ ) растет с увеличением абсолютного значения давления  $p$ .

Полученные экспериментальные результаты подтверждают наличие сильной зависимости характеристик межэлектродного промежутка с виртуальным катодом от давления остаточных газов, которая имеет место даже при высоком вакууме ( $10^{-8}$  —  $10^{-9}$  мм рт. ст.). Однако для учета влияния остаточных газов на характеристики различных устройств, использующих свойства виртуального катода, желательно иметь количественные оценки. Существующие методы расчета прохождения тока через межэлектродные промежутки в режиме существования виртуального катода, в частности метод, описанный в работе [7], который может быть применен к реальным промежуткам, имеющим вольтамперные характеристики типа показанных на рис. 1, не учитывают наличия ионов остаточного газа. Непосредственный учет их через уравнение Пуассона для пространственного заряда весьма сложен.

Но рассматривая экспериментальные характеристики рис. 1, можно отметить, что их трансформация с изменением (ростом) дав-

ления подобна видоизменению вольтамперных характеристик одномерного модифицированного диода при изменении (уменьшении) плотности входящего в диод тока [7]. Эта аналогия, имеющая физическое основание, поскольку в случае изменения давления и плотности входящего тока ( $I_{вх}$ ) изменяется концентрация пространственного заряда, позволяет предложить следующую методику количественных оценок. Считая, что остаточные газы в приборе полностью ионизованы и ионы равномерно распределены внутри межэлектродного промежутка (это достаточно сильное допущение приемлемо в случаях, когда тепловая скорость ионов больше скорости их направленного движения), можно связать изменение концентрации пространственного заряда за счет изменения «ионного фона» с изменением давления:

$$\Delta n = - \frac{\Delta p N}{p_0}, \quad (1)$$

где  $N$  — число Лошмидта,  $p_0$  — нормальное давление.

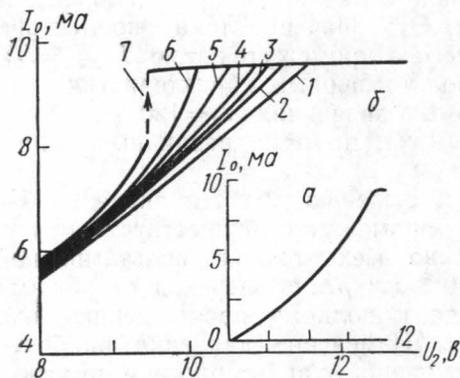


Рис. 1. а — вид типичной вольтамперной характеристики; б — вольтамперные характеристики при различных давлениях: 1 —  $p=2 \cdot 10^{-9}$ ; 2 —  $2 \cdot 10^{-8}$ ; 3 —  $4,5 \cdot 10^{-7}$ ; 4 —  $6 \cdot 10^{-7}$ ; 5 —  $8 \cdot 10^{-7}$ ; 6 —  $1,4 \cdot 10^{-6}$  и 7 —  $3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

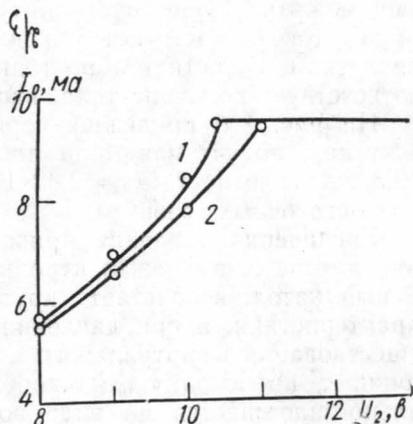


Рис. 2. Вольтамперные характеристики: 1 —  $p=8 \cdot 10^{-7}$ ; 2 —  $p=4,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. (о — расчетные точки)

Это изменение концентрации пространственного заряда можно условно назвать «первичным», поскольку в режиме существования виртуального катода, вследствие любого первичного возмущения пространственного заряда, происходит перераспределение токов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -диодами [8]. Поэтому окончательная зависимость плотности пространственного заряда от координаты оказывается сложной функцией ряда параметров. Аналогичный процесс установления распределения концентрации пространственного заряда происходит и при изменении плотности входящего тока. Простое аналитическое выражение, связывающее изменение концентрации с изменением плотности тока, может быть получено лишь для предельного случая — перехода из режима существования виртуального катода в режим полного прохождения тока ( $I_0 \rightarrow I_{вх}$ ). При этом можно воспользоваться

формулой, определяющей концентрацию в минимуме потенциала [8], которая в данном случае приобретает вид

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\pi m_0}{2kT_k}} \frac{1}{e_0} \Delta I_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где  $T_k$  — температура катода,  $k$  — постоянная Больцмана,  $m_0, e_0$  — масса и абсолютный заряд электрона.

Поскольку в рассматриваемом предельном случае процессы перераспределения токов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -диодами уже не имеют места, изменение концентрации за счет компенсации ионами остаточных газов будет соответствовать формуле (1) и будет одинаковым в любой плоскости внутри межэлектродного промежутка, в том числе и в плоскости минимального потенциала. Это позволяет нам, приравнявая выражения (1) и (2), найти изменение входящего тока, которое с точки зрения изменения концентрации пространственного заряда эквивалентно заданному изменению давления

$$-\Delta I_{\text{вх}} = \frac{Ne_0}{\rho_0} \sqrt{\frac{2kT_k}{\pi m_0}} \Delta p. \quad (3)$$

Связь между  $\Delta I_{\text{вх}}$  и  $\Delta p$ , даваемая формулой (3), в силу эквивалентности изменения давления и изменения плотности тока, должна сохраняться и для других режимов существования виртуального катода, отличных от предельного.

Сведя изменение давления к изменению плотности тока, для последующего анализа уже можно пользоваться разработанным методом расчета характеристик модифицированного диода [7]. Проиллюстрируем это следующим примером.

На рис. 2 кривая 2 представляет собой экспериментальную вольтамперную характеристику, соответствующую давлению  $4,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. (см. кривую 3 рис. 1, б). По этой характеристике в соответствии с методикой, изложенной в [9], определяются параметры одномерного модифицированного диода, эквивалентного исследуемому межэлектродному промежутку. Контрольный расчет характеристики по этим параметрам (методом работы [7]) дает точки, хорошо ложащиеся на экспериментальную кривую 2 (см. рис. 2), что подтверждает правильность выбора эквивалентного диода. Изменение давления до  $8 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. трансформирует экспериментальную характеристику, которая приобретает вид, показанный на рис. 2 (кривая 1). Согласно формуле (3), это должно соответствовать изменению плотности входящего тока на  $\Delta I_{\text{вх}} = 1,9 \cdot 10^{-2}$  а/см<sup>2</sup>. Расчет вольтамперной характеристики по тем же параметрам эквивалентного диода, но с измененной плотностью тока, дает значения, нанесенные на рис. 2 точками. Как видим, расчетные точки с хорошей точностью ложатся на экспериментальную кривую 1, соответствующую измененному давлению. Такое же соответствие расчета и эксперимента было получено и для всех характеристик рис. 1, б.

Приведенный пример может служить доказательством правомерности положенного в основу наших рассуждений предположения об эквивалентности изменения давления и изменения плотности входящего тока, а также подтверждает применимость предложенной методики расчета.

В заключение отметим, что выражение (3) позволяет применить для определения связи между малыми флуктуациями давления оста-

точных газов и вызываемыми ими флуктуациями тока, проходящего через межэлектродный промежуток с виртуальным катодом, выражение для коэффициента депрессии флуктуаций тока  $\Gamma = dI_0/dI_{вх}$ , полученное в работе [7]. Это может оказаться существенным, например, для оценки компонента шума, связанного с остаточными газами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костиенко А. И., Девятков М. Н., Пирогов Ю. А. «Электроника СВЧ», № 2, 1967.
2. Девятков М. Н., Костиенко А. И., Пирогов Ю. А., Романюк С. К. «Электроника СВЧ», № 9, 1970.
3. Девятков М. Н., Шарихин В. Ф. «Радиотехника и электроника», 13, № 12, 1968.
4. Гвоздовер С. Д., Слудский В. Н. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мех., мат., астроном., физ., химии, № 2, 1956.
5. Спивак Г. В. ЖЭТФ, 4, № 5, 1934.
6. Spiwak G., Ignatow A. S. Phys. Zeitschr. der Sowjetunion, 6, No. 1—2, 1934.
7. Девятков М. Н., Овчинникова Г. И. «Электроника СВЧ», № 8, 1971; фонды ин-та «Электроника», ДЭ-378.
8. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот, гл. II. М., 1956.
9. Девятков М. Н., Овчинникова Г. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 13, № 1, 1972.

Поступила в редакцию  
1.11 1972 г.

Кафедра  
радиотехники