

УДК 621.380

М. Н. ДЕВЯТКОВ, Г. И. ОВЧИННИКОВА

РЕАКЦИЯ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОМЕЖУТКА С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Приведен приближенный расчет температурной чувствительности модифицированного диода в режиме существования виртуального катода. Приводятся результаты экспериментальных исследований реакции такого диода на изменение температуры электронов, находящиеся в соответствии с расчетными данными.

Результаты, приведенные в работах [1—4], показывают, что межэлектродные промежутки, работающие в режиме существования виртуального катода, характеризуются высокой чувствительностью к возмущениям, вносимым в электронный поток. Эти возмущения могут иметь характер изменения скоростей электронов пучка, вызванных действием СВЧ поля [1—3], или изменения граничных условий, вызванных действием светового излучения [4]. Однако специфический характер этих возмущений затрудняет получение общих закономерностей реакции виртуального катода на изменение состояния электронного потока.

Более общая картина может быть получена, если вносимые в пучок возмущения свести к изменению температуры электронов, которая характеризует энергетическое состояние пучка. Решение задачи о прохождении тока через межэлектродный промежуток, в который входит электронный поток со значительными начальными скоростями (так называемый модифицированный диод), при учете тепловых скоростей электронов представляется весьма сложным. Попытка строгого ее решения в одномерном случае была, в частности, предпринята в работе [5], однако полученные там результаты могут быть использованы только после численной обработки на ЭВМ и не поддаются непосредственной интерпретации. Поэтому нами был применен приближенный метод расчета модифицированного диода, который позволяет получать необходимые зависимости с достаточной степенью точности. Расчет проводился для одномерного случая. Полученные результаты проверялись экспериментально.

§ 1. Метод расчета статических характеристик модифицированного диода

Модифицированный диод можно рассматривать как межэлектродный промежуток, образованный плоской идеальной сеткой и параллельным ей плоским коллекторным электродом, в который через сетку, нор-

3

мально ее плоскости, входит неограниченный по сечению электронный поток с плотностью тока I_{BX} (рис. 1, *a*). Потенциал сетки V_1 существенно выше нуля (за нуль принимается потенциал эмиттера). При соответствующем сочетании потенциалов U_1 и U_2 , плотности тока I_{BX} и расстояния между электродами *d* в промежутке реализуется режим ограничения проходящего тока пространственным зарядом [6], т. е. распределение потенциала в промежутке приобретает вид, показанный на



Рис. 1. Схематическое изображение модифицированного диода (а) и распределение потенциала в нем (б)

рис. 1, б. В этом случае в промежутке возникает виртуальный катод (плоскость минимального потенциала, причем значение потенциала в минимуме отрицательно). Потенциал виртуального катода U_m и опре-



Рис. 2. Графическое решение системы уравнений модифицированного диода

деляет плотность тока I_0 , проходящего на коллектор. Виртуальный катод является потенциальным барьером, отражающим те электроны. $\frac{2e_0}{|U_m|}$. тепловые скорости которых меньше величины $v_m =$ m. Поэтому, если в промежутке «плоскость виртуального катода — коллектор» проходит ток I₀, то в промежутке «сетка — виртуальный катод» ток складывается из входящего $I_{\rm BX}$ и отраженного $I_{\rm BX} - I_0$, т. е. равен 2 I_{вх}—I₀. Эти два промежутка можно рассматривать как два эквивалентных диода — α- и β-диод (см. рис. 1, б) с общим «эмиттером» виртуальным катодом. Для каждого из них справедлив закон «трех вторых» [6, 7] и, кроме того, ток Io определяется тормозящим потенциалом виртуального катода U_m через формулу Больцмана. Записывая для α - и β -диодов эти выражения, связывающие проходящий ток I_0 с I_{BX} , U_1, U_2, d и T (температура электронного потока, равная температуре катода), можно получить следующую систему уравнений:

$$I_{0} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{(U_{2} - U_{m})^{3/2}}{(d - x_{m})^{2}} \left[1 + 2,66 \left(\frac{U_{0}}{U_{2} - U_{m}} \right)^{1/2} \right];$$

$$2I_{BX} - I_{0} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{(U_{1} - U_{m})^{3/2}}{x_{m}^{2}};$$

$$I_{0} = I_{BX} e^{U_{m}/U_{0}}.$$
(1)

Здесь $U_0 = \frac{kT}{e_0} = 8,62 \cdot 10^{-5} T$, e_0 — абсолютный заряд электрона, k —

постоянная Больцмана, плотность тока — в *а/см²*, потенциалы — в вольтах, температура — в °К. Во втором уравнении системы, описывающем прохождение тока в α-диоде, опущен сомножитель, аналогичный сомножителю в квадратных скобках первого уравнения системы. Это допустимо при выполнении соотношения

$$U_1 > U_2 > |U_m|$$
, r. e. $U_1 \gg |U_m|$,

что соответствует практически интересным случаям [1-3]. Система (1) полностью описывает прохождение тока через модифицированный диод с учетом тепловых скоростей, однако для получения конкретных зависимостей, например, вольтамперной характеристики $I_0=f(U_2)$, здесь приходится прибегать к численному или графическому решению, поскольку трансцендентные уравнения системы к алгебраическим не приводятся. Ошибка в нахождении решений этой системы уравнений при выполнении условий [6, 7]

2,66
$$\left(\frac{U_0}{U_1-U_m}\right)^{1/2} \ll 1$$
и 11600 $\frac{U_2-U_m}{T} \gg 2$

не превышает единиц процентов, что вполне приемлемо для практического использования, если учесть точность определения параметров промежутка. Решение системы (1) для конкретных параметров удобно проводить по следующей схеме.

1. В координатах (U_m, I_0) строится график зависимости, даваемый третьим уравнением системы (1) (рис. 2, сплошная кривая). Практически бывает достаточно задавать значения U_m в интервале от 0 до $--0,5 \ e$.

2. Из второго уравнения системы (1) определяется с учетом третьего уравнения этой системы зависимость $x_m = f(U_m)$:

$$x_m = \left[2,33 \cdot 10^{-6} \frac{(U_1 - U_m)^{3/2}}{J_{\text{EX}}(2 - e^{U_m/U_0})}\right]^{1/2}.$$
 (2)

С помощью формулы (2) вычисляются значения x_m , соответствующие значениям U_m , принятым в п. 1.

3. Найденные значения x_m используются для построения зависимости $I_0 = f(U_m)$, даваемой первым уравнением системы (1) (рис. 2, пунктирные кривые). Зависимости строятся для набора значений U_2 , позволяющих получить вольтамперную характеристику промежутка.

Точки пересечения пунктирных кривых со сплошной соответствуют решениям системы уравнений. Решений может быть одно или два (в зависимости от сочетания параметров). В последнем случае, которому соответствует пример рис. 2, из каждой пары решений физический смысл имеет то, которое соответствует возрастанию тока коллектора при увеличении потенциала коллектора, т. е. следует принимать во внимание только нижние точки пересечения. Как видно из рис. 2, увеличение потенциала коллектора приводит к тому, что точки пересечения сходятся и при некотором значении $U_2 = U_{2m}$ (на рис. — $U_2^{(3)}$) вырождаются в точку касания. При дальнейшем увеличении U_2 система уравнений становится несовместной. Это соответствует тому, что при $U_2=U_{2m}$ исчезает виртуальный катод, а ток коллектора скачком возрастает и достигает насыщения, $I_0=I_{вx}$. Найденные таким образом решения позволяют построить вольтамперную характеристику $I_0=f(U_2)$. Одновременно могут быть получены зависимости $U_m=f(U_2)$ и $x_m=f(U_2)$.

5

Соответствие расчетных и экспериментальных характеристик может быть показано на следующем примере. Для реального межэлектродного промежутка, представляющего собой зазор в 1,3 мм между двумя плоскими сетками, в который через одну из сеток входит электронный пучок круглого сечения (ϕ 3 мм), экспериментальная вольтамперная характеристика показана на рис. 3, кривая 1 (I_0 — ток, достигающий плоскости второй сетки; $I_{вx}$ =14 ма; V_1 =75 в). На том же рисунке кривой 2 представлена расчетная характеристика, полученная для указанных значений параметров и температуры электронов, принятой равной температуре катода T=1300°K. Сопоставление показывает, что расчетная и экспериментальная характеристики достаточно близки, несмотря на некоторое отличие условий в реальном модифицированном диоде с электронным пучком конечного сечения от идеального одномерного случая.

Предложенный метод, позволяя рассчитывать вольтамперные характеристики с учетом температуры, дает возможность анализировать влияние тепловой энергии электронного потока на условия прохождения тока через модифицированный диод.

§ 2. Расчет температурной чувствительности

Система уравнений (1) позволяет получить зависимость плотности тока, проходящего через модифицированный диод I_0 , от температуры электронного пучка. При этом целесообразно рассматривать величину $\frac{dI_0}{dT}$, которую можно назвать «температурной чувствительностью» диода.

Для упрощения задачи определения температурной чувствительности можно ввести дополнительное допущение, предположив, что координата виртуального катода x_m при малых изменениях температуры остается постоянной. С учетом этого предположения температурная чувствительность может быть получена дифференцированием первого уравнения системы (1) с использованием третьего уравнения этой системы

$$\frac{dI_0}{dT} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{(d-x_m)^2} \cdot \frac{\frac{0,025}{2\sqrt{T}}R^2 - \frac{k}{e_0} \ln \frac{I_0}{I_{Bx}} \left(\frac{3}{2}R + 0,025\sqrt{T}\right)}{1 + \frac{2,33 \cdot 10^{-6}}{(d-x_m)^2} \frac{kT}{e_0I_0} \left(\frac{3}{2}R + 0,025\sqrt{T}\right)},$$
 (3)

где

$$R = \left(U_2 - \frac{kT}{e_0} \ln \frac{I_0}{I_{\rm BX}}\right)^{1/2}.$$
 (4)

Фигурирующая в выражении (3) величина x_m может быть определена по формуле (2).

Если в явном виде известна зависимость $I_0 = f(U_2)$, т. е. вольтамперная характеристика диода, то для сравнительной оценки температурной чувствительности межэлектродных промежутков с различными параметрами удобно ввести в рассмотрение крутизну вольтамперной характеристики $k_v = \frac{dI_0}{dU_2}$. Тогда выражение (4) запишется в виде

$$R = \frac{2}{3} \left[\frac{K_v (d - x_m)^2}{2,33 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{kT}{e_0} - \frac{k_v}{I_0} \right)} - 0,025 \sqrt{T} \right].$$
 (5)

Порядок величины температурной чувствительности задается, в основном, числителем выражения (3), который, в свою очередь, определяется величиной *R*. Величина же *R*, как это видно из (5), пропорцио-





Рис. 3. Вольтамперные характеристики межэлектродного промежутка: 1 — экспериментальная, 2 — расчетная

Рис. 4. Схематическая конструкция макета (крепление электродов и выводы не показаны)

нальна крутизне вольтамперной характеристики. Отсюда следует, что величина температурной чувствительности непосредственно связана с величиной крутизны вольтамперной характеристики.

§ 3. Экспериментальное определение температурной чувствительности

Эксперименты по определению температурной чувствительности промежутка с виртуальным катодом проводились на макетах, схематическая конструкция которых представлена на рис. 4. Электронный поток создавался пушкой, состоящей из L-катода и двух диафрагм с сетками 1 и 2. Затем он поступал в промежуток между второй сеткой и коллектором. Коллектор имел форму цилиндрического стакана. Подбором электрических параметров виртуальный катод (плоскость минимального потенциала) создавался в промежутке «вторая сетка-коллектор»; он может рассматриваться как модифицированный диод. В процессе экспериментов наблюдалось прохождение тока через этот межэлектродный промежуток в зависимости от температуры электронов. Температура электронного потока изменялась путем изменения температуры катода при повышении напряжения накала. Предварительно производилась градуировка используемых катодных узлов, т. е. снималась зависимость $T_{\text{кат}} = f(V_{\text{нак}})$ с помощью оптического пирометра. Пользуясь этой зависимостью, можно изменять номинальную температуру катода (1300°К) на любую заданную величину. Для контроля были проведены измерения температуры электронного потока в рассматриваемом промежутке методом задерживающего потенциала. Эти измерения дали значения температуры, которые превосходили цветовую температуру катода на 20-25%. Однако в данных исследованиях существенны не столько абсолютные значения температуры, сколько величины ее изменения. Сопоставление же данных измерения цветовой температуры и электронной температуры показывает, что при малых изменениях температуры катода ($\Delta T_{
m kat} \ll T_{
m kat}$) оба метода дают значения ΔT одного порядка (расхождение не превышает точность измерений). Таким образом, контрольные измерения показали, что градуировка катода по цветовой температуре позволяет с хорошей степенью точности задавать

7

определенные изменения температуры электронного потока изменением напряжения накала.

На рис. 5 представлена вольтамперная характеристика промежутка «сетка-коллектор» (кривая 1). По виду характеристики можно судить о том, что в области напряжений до 12 в в исследуемом промежутке существует виртуальный катод, ограничивающий величину тока, проходящего на коллектор. При напряжениях, больших в 12 в, виртуальный катод уже не существует и весь ток, входящий в промежуток, проходит на коллектор. На этом же рисунке представлена зависимость приращений коллекторного тока ΔI_0 от напряжения на коллекторе при фиксированном изменении температуры катода на +10, +4 и -10° , причем ΔI_0 определяется в каждой точке как разность коллекторных токов при измененной и нормальной температурах (кривые 2, 3, 4 соответственно). Для регистрации малых изменений токов использовалась компенсационная схема. Величина ΔI_0 при заданном ΔT характеризует чувствительность реакции промежутка на изменение температуры электронов. Анализируя зависимости $\Delta I_0 = f(U_2)$, представленные на рис. 5, можно заметить, что чувствительность возрастает по мере приближения к границе существования виртуального катода, достигая максимума при потенциалах, близких к переходу в режим полного прохождения тока. Увеличение температуры электронов сопровождается возрастанием тока через промежуток с виртуальным катодом ($\Delta I_0 > 0$), уменьшение температуры приводит к уменьшению тока ($\Delta I_0 < 0$); при этом абсолютная величина $|\Delta I_0|$ определяется абсолютной величиной изменения температуры.

Кроме того, приращения коллекторного тока при изменении температуры катода наблюдаются не только в режиме ограничения тока пространственным зарядом, но и в режиме полного токопрохождения. Это вызвано тем, что увеличение температуры катода приводит к некоторому увеличению катодного тока, и это сопровождается увеличением тока, входящего в промежуток «сетка—коллектор» $I_{\rm BX}$ на величину $\Delta I_{\rm BX}$. Изменение тока, входящего в рабочий промежуток, может быть скомпенсировано напряжением первой сетки Uvck. Однако экспериментальные исследования показали, что компенсация входящего тока существенна лишь в режиме полного токопрохождения и практически не сказывается на величине ΔI_0 в режиме существования виртуального катода. Для исследовавшихся макетов при изменении температуры в пределах $\Delta T=\pm\,10^\circ$ зависимость $\Delta I_0=f(\Delta T)$ линейна. Это позволяет определить ΔI_0 температурную чувствительность как отношение ΛT

Переходя к сопоставлению экспериментальных зависимостей с расчетными, следует иметь в виду, что реальные межэлектродные промежутки могут существенно отличаться от идеализированного диода, для которого проводился расчет. Однако если можно подобрать плоский межэлектродный промежуток с такими параметрами, что его вольтамперная характеристика, рассчитанная методом, описанным в § 1, будет близка к экспериментальной характеристике реального промежутка, то температурная чувствительность может быть рассчитана исходя из параметров эквивалентного промежутка.

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость температурной чувствительности (кривая I), полученная для вольтамперной характеристики, приведенной на рис. 5 (кривая I), по результатам, соответствующим рис. 5 (кривые 2—4). Сопоставление ее с расчетной зависимостью для эквивалентного плоского промежутка с параметрами d=0.56 см и $\phi=0.63$ см, $U_1=150$ в, $I_{\rm BX}=1.5\cdot10^2$ a/cm^2 , представленной на том же рисунке кривой 2, показывает следующее. По мере приближения к режиму исчезновения виртуального катода, что соответствует увеличению крутизны вольтамперной характеристики, температурная чувствительность в обоих случаях возрастает. При этом наблюдается уменьшение различия абсолютных значений расчетной и экспериментальной температурной чувствительности, которые практически совпадают в точках, соответствующих максимальным значениям.



Рис. 5. Вольтамперная характеристика промежутка (кривая 1) и зависимости приращений коллекторного тока ΔI_0 от потенциала V_2 при изменении температуры катода на заданное число градусов (кривая 2 соответствует изменению температуры $\Delta T = +10^\circ$, $3 - \Delta T =$ $= +4^\circ$, $4 - \Delta T = -10^\circ$)



Рис. 6. Зависимость температурной чувствительности от потенциала коллектора: 1— экспериментальная кривая, 2— расчетная

В заключение следует сделать некоторые выводы. Межэлектродный промежуток в режиме существования виртуального катода реагирует величиной проходящего тока на изменение температуры электронного пучка. Чувствительность реакции определяется крутизной вольтамперной характеристики, возрастая по мере приближения к условиям перехода от режима существования виртуального катода к режиму полного токопрохождения. В обследованных экспериментальных макетах температурная чувствительность достигала значений 7,5 мка/град (при точности измерений тока до 10⁻⁷ а это позволяет регистрировать изменения температуры порядка 10⁻² град). Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температурной чувствительности показывает, что предложенный метод расчета может быть использован для оценки максимальной чувствительности реальных межэлектродных промежутков; количественное соответствие может быть получено, если расчет проводить для эквивалентного плоского диода, параметры которого выбираются из соображений подобия вольтамперных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Костиенко А. И., Девятков М. Н., Лебедь А. А. «Радиотехника и
- Электроника», 4, № 3, 1959.
 Девятков М. Н., Костиенко А. И., Мясоедов Е. Я. «Радиотехника и электроника», 4, № 5, 1962.
 Костиенко А. И., Девятков М. Н., Пирогов Ю. А. «Электронная тех-оправляется и составляется в составляется в составляется и составляется и составляется в состав
- ника», электроника СВЧ», № 2, 1967.
- 4. Девятков М. Н., Шарихин В. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 1968.
- 5. Мякишев Г. Я. «Радиотехника и электроника», 6, № 2, 1961. 6. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М., ГИТТЛ, 1956.
- 7. Rohte H., Kleen W. Grundlagen und Kennlinien der Electronenröhren. Leipzig, Akad. Verl.- Ges., 1953.

Поступила в редакцию 20.1 1969 г.

Кафедра радиотехники