

А. И. КОСТИЕНКО, Ю. А. ПИРОГОВ

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТЕНКИ НА ДЕТЕКТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА

В результате сравнительного анализа данных, полученных при экспериментальном исследовании СВЧ-детектирования на стеклянных плоскоэлектродных лампах с дисковыми сетками, показано, что удаленность диэлектрической стенки от оси электронного пучка определяет знак детекторного тока в анодной цепи прибора.

В экспериментах по электронному СВЧ-детектированию сигналов, подводимых к промежутку с виртуальным катодом, создаваемым между электродами модифицированного диода¹ [1] было замечено, что детекторный ток ΔI_a (изменение анодного тока I_a при СВЧ-возмущении состояния виртуального катода) может иметь различный знак. Он либо принимает положительные значения на начальном участке вольтамперной характеристики промежутка и отрицательные вблизи насыщения, либо при всех анодных напряжениях отрицателен.

Так в одномерных промежутках (диаметр однородного по сечению электронного пучка много больше расстояния между электродами) детекторный ток может быть отрицательным при таком состоянии виртуального катода, когда безразмерный потенциал его $\epsilon_m < 0,5$ [2] ($\epsilon_m = \frac{e_0 V_m}{kT}$, V_m — потенциал, T — температура электронов, e_0 и k — мировые константы). Если же $\epsilon_m > 0,5$, детекторный ток может принимать отрицательные значения лишь в том случае, когда на виртуальный катод действует сигнал достаточно большой мощности [3]. В приборах с ограниченными по сечению (двумерными) электронными пучками появление отрицательных детекторных токов может быть связано с наличием радиального провисания потенциала виртуального катода, где осевые и периферийные трубки тока пучка дают различные по величине и знаку приращения анодного тока: их соотношением и определяется знак суммарного детекторного тока во внешней цепи прибора [4].

В [2] объясняется принципиальная возможность появления отрицательных детекторных токов, в [4] даются некоторые поправки к ос-

¹ Модифицированным диодом называют двухэлектродный промежуток, в который электроны входят с существенно отличными от нуля скоростями.

новному эффекту, объясняющие сдвиг точки перехода детекторной характеристики $\Delta I_a[V_a]$ (V_a — напряжение на аноде модифицированного диода) через нуль в сторону отсечки анодного тока, разработка в [3] может привести к появлению только отрицательных детекторных токов по всей вольтамперной характеристике (при очень больших уровнях СВЧ-сигнала). Однако в ряде случаев (при наличии диэлектрической стенки, окружающей электронный пучок) даже при малых уровнях СВЧ-сигнала могут иметь место только отрицательные изменения анодного тока или же значительные смещения точки перехода детекторного тока через нуль к отсечке анодного тока, не объясняемые одним лишь радиальным провисанием потенциала виртуального катода. Анализу этих явлений и посвящена настоящая работа.

При изучении влияния диэлектрика на детекторные характеристики виртуального катода было обследовано множество макетов электронных ламп, отличавшихся расстоянием D между электродами исследуемого промежутка, диаметром $d_{\text{п}}$ электронного пучка на входе в промежуток (диаметр отверстия входной диафрагмы) и диаметром $d_{\text{ст}}$ диэлектрического (стеклянного) цилиндра, окружавшего электронный пучок. Об основной серии ламп, на которых проводились эти исследования, можно получить представление из рис. 1, а, где показано расположение электродов промежутка взаимодействия и включение макета в волновод 8-миллиметрового диапазона волн. Для уменьшения влияния вторичной эмиссии и локального нагрева на изучаемые эффекты коллектор 3 был затянут с торца сеткой (траектории электронов внутри коллектора показаны на рис. 1, б). Электронный пучок вводился в промежуток между электродами 2 и 3, касавшимися стенки баллона лампы ($d_{\text{ст}}=5,5$ мм). Кроме ламп описанного типа (их характеристики приведены на рис. 3) изучались и другие приборы, принципиально такие же, но отличавшиеся большими размерами элементов промежутка взаимодействия D , $d_{\text{п}}$ и $d_{\text{ст}}$.

Для сравнения работы всех этих ламп введем безразмерные параметры $\tau_1=D/d_{\text{п}}$ и $\tau_2=d_{\text{п}}/d_{\text{ст}}$, которые с достаточной для качественного рассмотрения объективностью отражают степень связи электронного потока с диэлектрической стенкой. Если $d_{\text{п}}$ и $d_{\text{ст}}$ примерно одинаковы ($\tau_2 \cong 1$), то электроны потока в области виртуального катода будут оседать на стенку, заряжая ее до тех пор, пока потенциал виртуального катода в промежутке не выравняется (рис. 2, а). На рис. 2 изображено распределение потенциала виртуального катода для различных значений τ_2 . С удалением диэлектрика от границ пучка в распределении потенциала виртуального катода наблюдается все более заметное провисание, так как доля попадающих на стенку электронов при этом уменьшается (рис. 2, б и в). Таким образом, в поперечном сечении пучка могут реализоваться различные распределения потенциала по радиусу с весьма малой (рис. 2, а), средней (рис. 2, б) и значительной

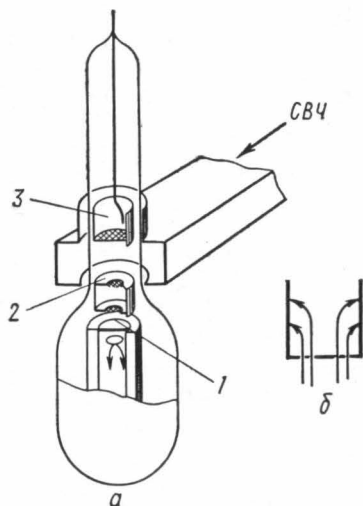


Рис. 1. Конструкция экспериментальных ламп (а) и ход электронных траекторий внутри коллектора (б): 1 — катод, 2 — ускоряющий электрод, 3 — коллектор

(рис. 2,в) разностью потенциалов между осью и периферией пучка. Выбранные характеристики ламп расположены на рис. 3 соответственно распределениям потенциала так, что в приборах с характеристиками 3,а реализуется распределение 2,а, в приборах типа 3,б, в — распределение, 2,б и в приборах 3,г — распределение 2,в.

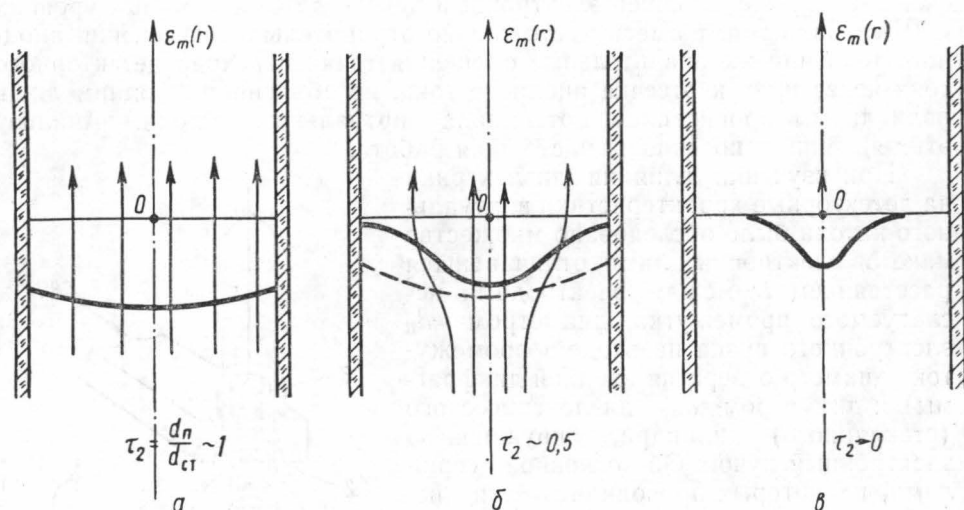


Рис. 2. Поперечные распределения потенциала в области виртуального катода при различной удаленности диэлектрической стенки от оси пучка

Рассматривая кривые рис. 3, где кружками нанесены вольтамперные характеристики промежутков взаимодействия, а треугольниками — детекторные (при мощности ~ 1 мвт), можно заметить, что длина вольтамперных характеристик (область анодных напряжений, при которых существует виртуальный катод) определяется обоими параметрами τ_1 и τ_2 . С увеличением τ_1 и уменьшением τ_2 объем пространственного заряда возрастает и исчезновение виртуального катода происходит при больших напряжениях на аноде. В то же время характер детекторной кривой (соотношения положительных и отрицательных приращений анодного тока) определяется, как видно из рис. 3, главным образом параметром τ_2 , т. е. удаленностью диэлектрической стенки от потока. Рис. 3,а показывает, что при $\tau_2=0,83$, близком к единице (электронный пучок проходит вблизи диэлектрика и распределение потенциала виртуального катода соответствует рис. 2,а), в анодной цепи наблюдаются и положительные и отрицательные детекторные токи. Причем точка перехода детекторной характеристики через нуль ($\Delta I_a=0$) находится при отношении анодного тока I_a к току насыщения ΔI_0 (равном 0,6), полученном для этой точки в одномерной теории [2, 3]. Соответствие теории и эксперимента, проведенного на физически двумерной модели ограниченного по сечению электронного пучка, объясняется хорошей имитацией в данном макете одномерных условий, во-первых, за счет малости расстояния между электродами по сравнению с диаметром пучка ($\tau_1=0,17 \ll 1$), и, во-вторых, за счет близости к пучку диэлектрической оценки ($\tau_2=0,83 \approx 1$), создающей условия равномерного распределения потенциала виртуального катода по радиусу пучка ($grad_r V_m=0$).

В приборе, характеристики которого представлены на рис. 3,б ($\tau_2=0,44$), точка перехода кривой $\Delta I_a(V_a)$ через нуль сдвинута в сторону отсечки анодного тока ($I_{a0}/I_0=0,1$). На макете с характеристиками (рис. 3,в $\tau_2=0,33$) наблюдались только отрицательные изменения анодного тока.

Предпочтительное появление отрицательных детекторных токов в случае отодвинутой от пучка диэлектрической стенки (рис. 3,б, в) можно объяснить следующим образом. Имеющееся в этих случаях радиальное провисание потенциала виртуального катода (рис. 2,б) приводит к тому, что в плоскости катода протекает небольшой радиальный ток, обусловленный разностью потенциалов между осью и периферией пучка. Если на периферии пучка $\epsilon_m < 0,5$, то, как известно из [2, 3], в этих областях виртуального катода будет появляться отрицательный детекторный ток. Отражение от поверхности виртуального катода под действием СВЧ-поля дополнительной порции периферийных электронов приводит к увеличению плотности пространственного заряда на периферии, некоторому понижению потенциала периферии пучка, заряду диэлектрической стенки и соответствующему понижению ее потенциала. Уменьшение по этой причине разности потенциалов «периферия — ось» подавляет радиальный ток подзаряда стенки и приводит к накоплению пространственного заряда на оси пучка, т. е. к понижению потенциала на оси. Это, в свою очередь, ведет к частичному восстановлению радиального тока, дальнейшему увеличению заряда на стенке и дополнительному понижению ее потенциала и т. д., пока не установится новое положение динамического равновесия виртуального катода, соответствующее уровню действующего в промежутке СВЧ-сигнала.

В то же время на оси пучка, где $\epsilon_m > 0,5$, потенциал понижается в меньшей степени, чем возле стенки, так как при таких значениях потенциала виртуального катода должны иметь место положительные детекторные токи, напротив, приводящие к некоторому повышению потенциала на оси [2]. Однако в ограниченном по сечению диэлектрической стенкой пучке эффекты, обязанные влиянию диэлектрика (управление условиями на границе виртуального катода), могут быть существенно сильнее, чем первичные эффекты токораспределения на потенциальном барьере виртуального катода. О том же свидетельствуют исследования фотоэлектродного детектора, в котором световой сигнал за счет внешнего фотоэффекта со стенки управлял граничным потенциалом пучка [5, 6]. Таким образом, при действии в промежутке СВЧ-поля потенциал виртуального катода понижается по всему сечению пучка (в меньшей степени на оси, в большей — на периферии), причем величина радиального провисания потенциала (рис. 2,б, штриховая линия) уменьшается. По той же причине профиль виртуального катода (вогнутая в сторону входного электрода поверхность вращения) выравнивается, о чем можно, в частности, судить по фотографиям свечения остаточных газов в модифицированном диоде, полученным по методу [7] в статическом режиме (рис. 4,а, в, д) и при действии в промежутке СВЧ-сигнала (рис. 4,б, г, е). При сравнении фотографий отчетливо видно, что при действии продольного СВЧ-поля уменьшается свечение периферийных участков коллекторной области и одновременно увеличивается светимость соответствующих участков катодной области: это и есть свидетельство появления отрицательных изменений анодного тока на периферии.

Воздействие СВЧ-поля может перевести модифицированный диод из насыщения (рис. 4,а) в режим ограничения тока пространственным зарядом (рис. 4,б). Темные области, пересекающие электронный пучок

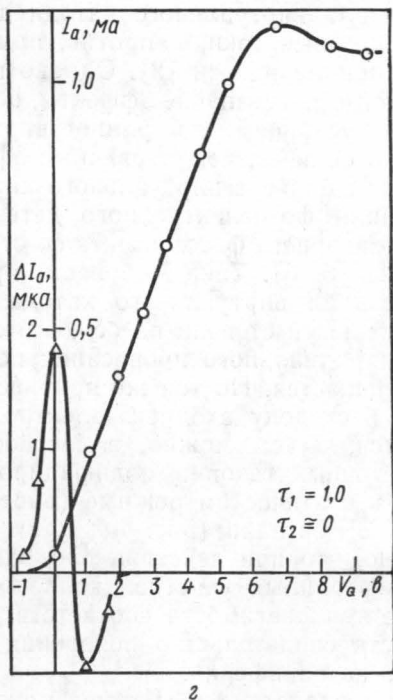
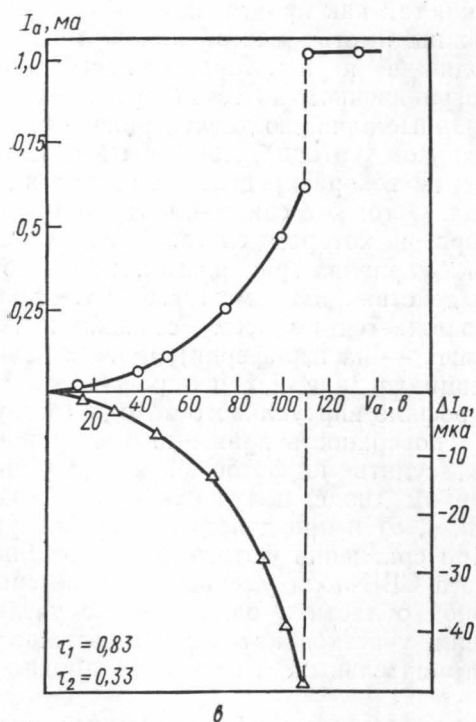
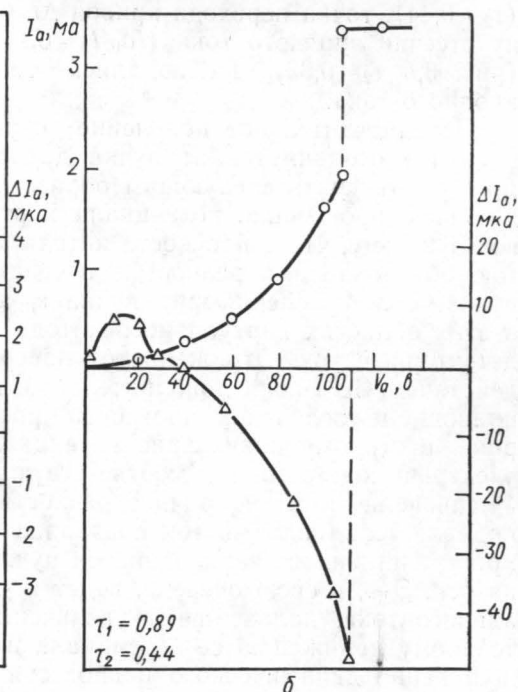
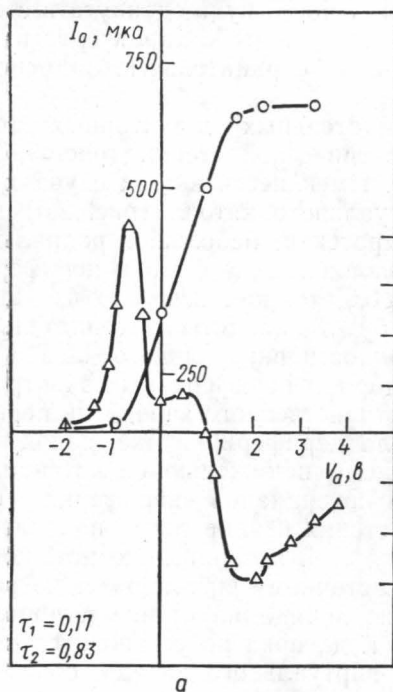


Рис. 3. Вольтамперные и детекторные характеристики экспериментальных ламп

в поперечном направлении (рис. 4,б), — это результат образования виртуального катода, в районе которого энергия электронов недостаточна для оптического возбуждения атомов или ионов остаточного газа.

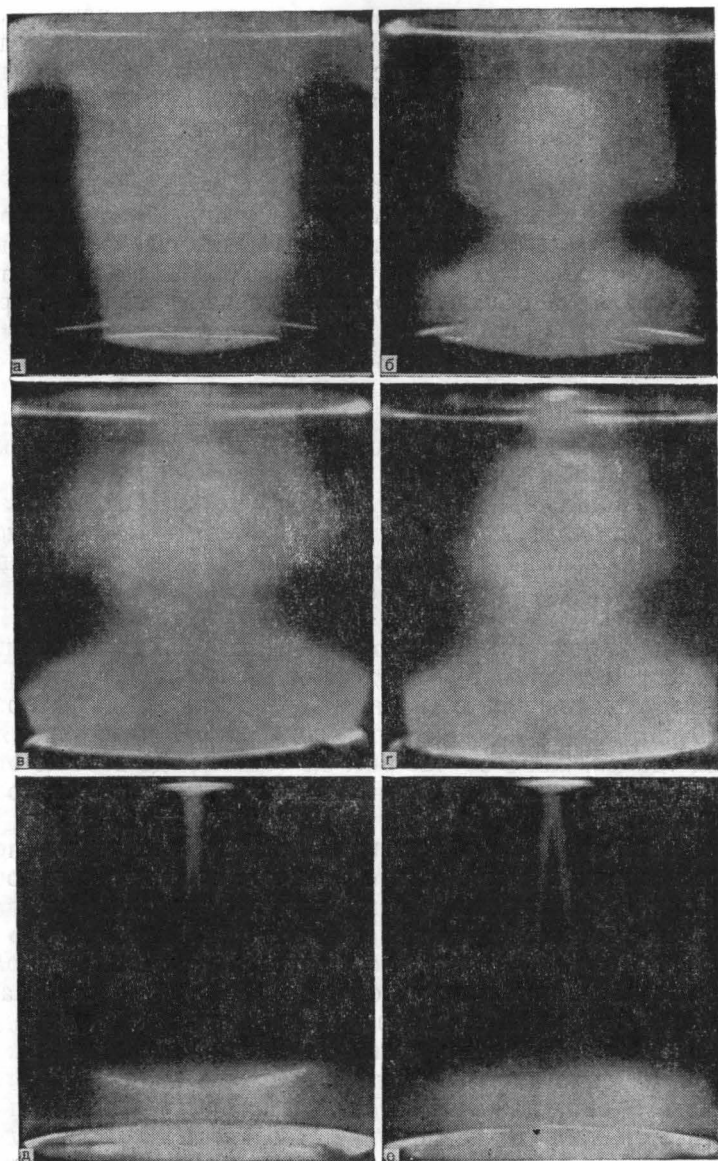


Рис. 4. Фотографии электронного промежутка (с характеристиками рис. 3,в) в статическом режиме (а, в, д) и при действии в промежутке поля СВЧ (б, г, е); а и б — статический режим соответствует «насыщению» анодного тока ($I_a=120$ в); в, г — режим существования ВК при значительных напряжениях на аноде ($U_a=80$ в); д, е — анод соединен с катодом ($U_a=0$)

В средней части вольтамперной характеристики, когда виртуальный катод существует и до и после подачи СВЧ-сигнала, детектирование сопровождается уменьшением свечения в коллекторной области, а ка-

тодная область (особенно ее периферийные участки) становится ярче и короче: виртуальный катод прижимается к входной сетке, а его потенциальный рельеф выравнивается. Наиболее четко выравнивание потенциального рельефа виртуального катода заметно на рис. 4, *д*, *е*, где приведены фотографии промежутка, работающего на начальном участке вольтамперной характеристики ($V_a \cong 0$ в). В этом случае коллекторная область свечения отсутствует и светящейся остается в районе коллектора лишь ионная «стрелка» — поток положительных ионов, рождающихся на входе в промежуток и увлекаемых полем виртуального катода.

При включении СВЧ-поля (рис. 4, *е*) верхняя граница катодной области свечения, прижимаясь к сетке, выравнивается, а острие ионной «стрелки» приближается к коллектору. Увеличение длины ионной стрелки означает увеличение фокусного расстояния электростатической линзы, образованной облаком пространственного заряда виртуального катода, что еще раз свидетельствует о выравнивании распределения потенциала виртуального катода по сечению пучка¹.

Возвращаясь к рис. 3, обратим внимание на то, что если на рис. 3, *б* ($\tau_2 = 0,44$) положительные детекторные токи имеются, то на рис. 3, *в* ($\tau_2 = 0,33$) они распространены по всей вольтамперной характеристике $\Delta I_a < 0$.

Следовательно, при $\tau_2 \sim 1/3$ стенка столь далеко располагается от оси пучка, что практически при всех напряжениях на коллекторе потенциал стенки в области виртуального катода $\varepsilon_m < 0,5$ обеспечивает понижение потенциала границ пучка при действии СВЧ-поля на виртуальном катоде.

Механизм положительной обратной связи между отдельными слоями пучка, осуществляемой посредством радиального тока, создает необходимые условия для появления отрицательных детекторных токов во всех точках вольтамперной характеристики. В то же время диэлектрик не так удален, как в случае рис. 3, *г* ($\tau_2 \cong 0$), где вообще отсутствует связь электронного потока со стенкой и снова появляются положительные детекторные токи с переходом в область отрицательных значений.

Таким образом, в присутствии диэлектрической стенки периферийные области электронного пучка оказывают особенно сильное влияние на электронику промежутка с виртуальным катодом. Управляя плотностью объемного заряда в периферийных областях, можно изменять опорный потенциал диэлектрической стенки, т. е. управлять граничными условиями, которые определяют состояние электронного пучка в целом.

В отличие от потока со свободными границами [4] определяющим здесь оказывается не столько «удельный вес» периферийных областей в составе электронного пучка, сколько сам факт наличия на его границе таких участков виртуального катода, в которых потенциал $\varepsilon_m < 0,5$. И если имеется контакт периферийных электронов с диэлектриком, появляющиеся на периферии под действием СВЧ-поля отрицательные изменения анодного тока усиливаются за счет положительной обратной связи между слоями пучка, осуществляемой посредством радиального тока, и обеспечивают преимущественное появление отрицательных детекторных токов во внешней цепи. Положительные детекторные токи в осевых трубках пучка демпфируют эту связь и приводят к выравниванию потенциального рельефа виртуального катода.

¹ Подробное описание фотографического метода с идентификацией областей и границ свечения остаточных газов можно найти в работе [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков М. Н., Овчинникова Г. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 3—10, 1970.
2. Гвоздовер С. Д. «Изв. вузов», радиофизика, 8, 2, 309, 1965.
3. Пирогов Ю. А. «Изв. вузов», радиоэлектроника, № 3, 3, 1972.
4. Пирогов Ю. А. «Изв. вузов», радиофизика, 14, 1619, 1971.
5. Девятков М. Н., Костиенко А. И., Шарихин В. Ф. Авторское свидетельство № 200034, заявл. 14 VI, 1966.
6. Девятков М. Н., Шарихин В. Ф. «Радиотехника и электроника», 13, 2217—2222, 1968.
7. Девятков М. Н., Пирогов Ю. А., Подколотин В. Н., Шарихин В. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 6, 49—55, 1967.

Поступила в редакцию
4.9 1972 г.

Кафедра
радиотехники