

Эффект аномального увеличения анодного тока в диодных структурах

Г.И. Чурюмов*, А.И. Экезли

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Ленина, 14, 61166 Харьков, Украина

(Получено 03.12.2013; опубликовано online 06.04.2014)

В данной работе рассматриваются вопросы токопрохождения в диодных структурах с оксидным катодом. Проведен анализ теоретических и экспериментальных анодных характеристик цилиндрических диодов с разрезным анодом. Показано, что в области значений анодного напряжения больше максимального наблюдается эффект самопроизвольного роста анодного тока и увеличения расхождения между теоретическими и экспериментальными характеристиками диодных структур. Установлено, что при этом напряжении происходит электронно-стимулированная десорбция ионов с поверхности анода с последующей их бомбардировкой катода, что вызывает вторичную электронную эмиссию и дополнительный рост анодного тока. Данный процесс сопровождается значительным увеличением температуры анода, обусловленной бомбардировкой электронами его поверхности.

Ключевые слова: Диод, Анодное напряжение, Оксидный катод, Вторичная электронная эмиссия, Анодный ток, Магнетрон, Область пространственного заряда, Область насыщения.

PACS number: 84.40.Fe

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование электронной эмиссии в многоэлектродных вакуумных приборах, связанное с формированием электронных потоков представляет собой актуальную задачу и вызывает несомненный практический интерес. Понимание закономерностей, присущих электронным процессам, позволяет проектировать и разрабатывать вакуумные электронные приборы с прогнозируемыми характеристиками.

В данной работе экспериментально исследуется явление аномального роста анодного тока в цилиндрических диодных структурах с оксидным катодом.

2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ

На рис. 1 схематично представлено поведение теоретической (1) и реальной (2) (снятой экспериментально) анодных характеристик диода. Анализ данных зависимостей показывает, что для диодов характерным является наличие трех областей: области начальных токов, области пространственного заряда и области насыщения [1]. В области начальных токов анодный ток появляется при малых отрицательных напряжениях на аноде и обусловлен электронами, которые способны преодолеть тормозящее действие отрицательного анодного напряжения U_a благодаря конечным значениям начальных скоростей вылета электронов с катода. В области пространственного заряда изменение плотности анодного тока описывается законом степени $3/2$, а в области насыщения характеристика диода представляет собой горизонтальную линию, учитывая, что анодный ток в этом случае равен току эмиссии с катода при любых значениях U_a .

Для определения анодного тока в области пространственного заряда (область II на рис. 1) цилиндрического диода с термоэмиссионным катодом воспользуемся выражением [2]:

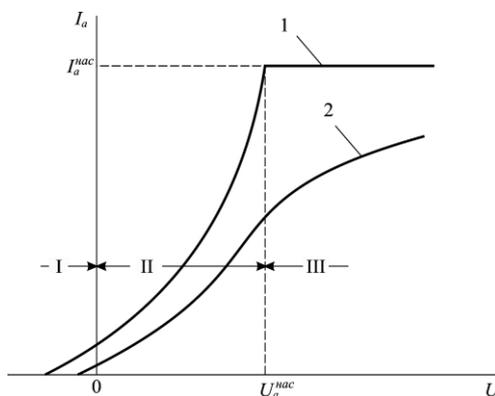


Рис. 1 – Анодные характеристики диода: I – область начального тока; II – область пространственного заряда; III – область насыщения

$$I_a = A \cdot B \cdot C, \quad (1)$$

где $A = 2.33 \cdot 10^{-3} \cdot S_a$; $B = (U_a - U_m)^{3/2} / ((r_a - r_k) - x_m)^2$; $C = (1 + 2.66 \cdot (U_T / (U_a - U_m))^{1/2}) \cdot \gamma$; $S_a = 2\pi \cdot r_a \cdot h_a$ - площадь анода, см²; r_a и r_k - радиусы анода и катода, см; h_a - высота анода, см; U_a - анодное напряжение, В; $U_m = -U_T \cdot \ln(j_e / j_a)$ - глубина потенциала на расстоянии x_m от катода (величина отрицательная); $x_m = 0.475 \cdot 10^{-3} \cdot (T_k / 1000)^{3/4} \cdot (1/j_a)^{1/2}$ - расстояние плоскости минимума потенциала от катода, см; $U_T = (k \cdot T_k) / e$ - величина, зависящая от температуры катода; j_a и j_e - плотность анодного тока и тока эмиссии с катода, А·см⁻²; T_k - температура катода в абсолютных градусах; $\gamma = (r_a - r_k)^2 / r_a^2 \cdot \beta$ и $\beta = f(r_d / r_k)$ - величины, которые зависят от размеров системы электродов, при отношении $r_d / r_k < 2$ $\beta = (1 - r_k / r_a)$.

В области насыщения III предполагается, что анодный ток или ток насыщения не зависит от U_a и равен току эмиссии с катода. Для случая оксидного катода с учетом «нормального» эффекта Шоттки ток эмиссии в диоде определяется как

* churyumov@kture.kharkov.ua

$$J_{em} = j_0(T_k) \cdot \exp\left(\frac{e^{3/2}}{k \cdot T_k} \cdot \sqrt{\frac{U_a}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot (r_a - r_k)}}\right), \quad (2)$$

где $j_0(T_k) = A_R \cdot \bar{D} \cdot T_k^2 \cdot \exp(-\phi/k \cdot T_k)$ - плотность тока насыщения при нулевом внешнем электростатическом поле (уравнение Ричардсона); $A_R = (4 \cdot \pi \cdot e \cdot k^2 \cdot m)/h^3 = 120.4$ - универсальная постоянная, А/см²·град²; e и m - заряд и масса электрона; k - постоянная Больцмана; h - постоянная Планка; $\bar{D} = (1 - \bar{r})$ - прозрачность потенциального барьера; \bar{r} - коэффициент отражения электронов от поверхности электрода (усредненный по энергиям); ϕ - работа выхода электронов, эВ; ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование токопрохождения проводилось для цилиндрического диода с оксидным катодом со следующими геометрическими параметрами: $r_k = 0,925$ мм; $r_a = 1,25$ мм; $h_a = 4,0$ мм. В качестве анода в диоде использовался медный анодный блок, представляющий собой разнорезонаторную структуру типа «щель-отверстие» с количеством резонаторов равным 20.

На рис. 2 представлены экспериментальные анодные характеристики для трех образцов диода с оксидным катодом и зависимости температуры внешней поверхности анодов от анодного напряжения. Результаты получены при напряжении накала $U_n = 4,5$ В.

Как видно, для анодных характеристик исследуемых образцов наблюдается наличие явно выраженных областей: области пространственного заряда и области насыщения, а также появление дополнительной области с аномальным ростом анодного тока при $U_a > U_a^{\max}$. При этом значение U_a^{\max} для каждого образца было разным, т.е. $U_a^{\max 1} = 80$ В, $U_a^{\max 2} = 110$ В и $U_a^{\max 3} = 180$ В. Разброс анодных напряжений U_a^{\max} , при которых проявляется эффект аномального роста анодного тока в исследуемых образцах диодов, объясняется различной эмиссионной способностью катодов, используемых в данных образцах. Напряжение U_a^{\max} для каждого образца можно рассматривать как пороговое, при достижении которого происходит электронно-стимулированная десорбция ионов с поверхности анодов. Данные ионы под действием ускоряющего напряжения $U_a > U_a^{\max}$ бомбардируют поверхность оксидного катода, вызывая дополнительный токоотбор с катода благодаря вторичной электронной эмиссии и, как следствие, вызывая аномальное увеличение анодного тока.

На рис. 3 показаны анодные характеристики диода, полученные для разных значений напряжений накала оксидного катода.

Как видно, поведение анодных характеристик зависит от величины тока эмиссии с катода. Так, при $U_n = 6,3$ В (случай нормальной эмиссии) на анодных характеристиках диода переход от режима пространственного заряда в режим насыщения связан с незначительным изменением наклона характеристики

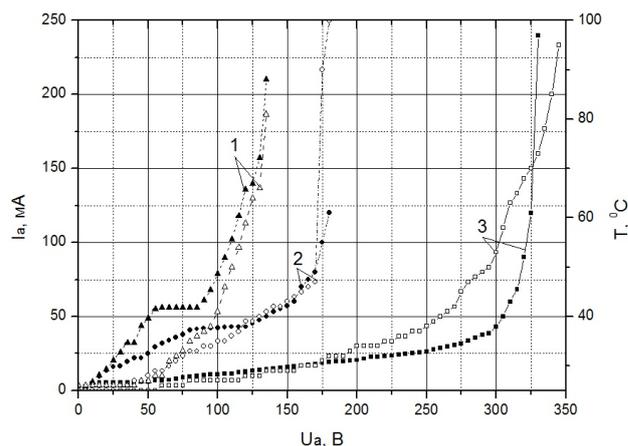


Рис. 2 – Экспериментальные зависимости анодного тока и температуры анода от анодного напряжения для трех образцов диода № 1, № 2 и № 3

(«аномальный» эффект Шотки [3]). С уменьшением напряжения накала $U_n = 5$ В и $4,5$ В (случай недокала) на анодных характеристиках все более явно проявляется область насыщения с последующим переходом в область аномального роста анодного тока. При значительном недокале, когда $U_n = 3,5$ В, более явно проявляется на анодной характеристике область насыщения. Последующее увеличение анодного напряжения, когда $U_a > 250$ В вызывает сначала рост анодного тока до $U_a \approx 430$ В, а затем его срыв.

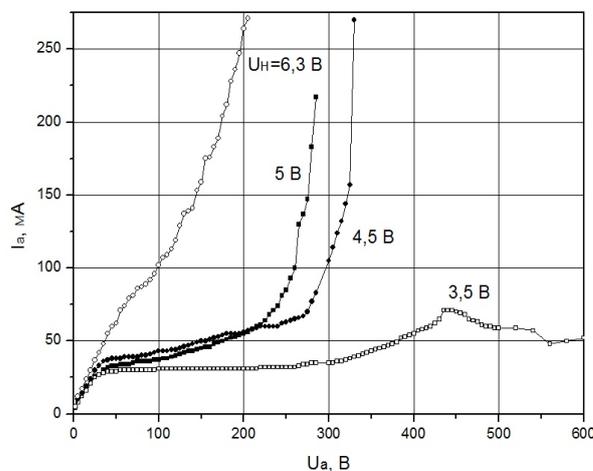


Рис. 3 – Экспериментальные анодные характеристики диода для разных напряжений накала оксидного катода

На рис. 4 представлены теоретическая и экспериментальная анодные характеристики диода. Теоретическая анодная характеристика получена с использованием выражений (1) и (2), соответственно, для областей пространственного заряда и насыщения. Как видно, в областях пространственного заряда и насыщения теоретические анодные характеристики проходят выше экспериментальных. При $U_a^{\max 3} > 110$ В поведение экспериментальной анодной характеристики изменяется. Это связано сначала с незначительным, а затем экспоненциальным ростом анодного тока и, как

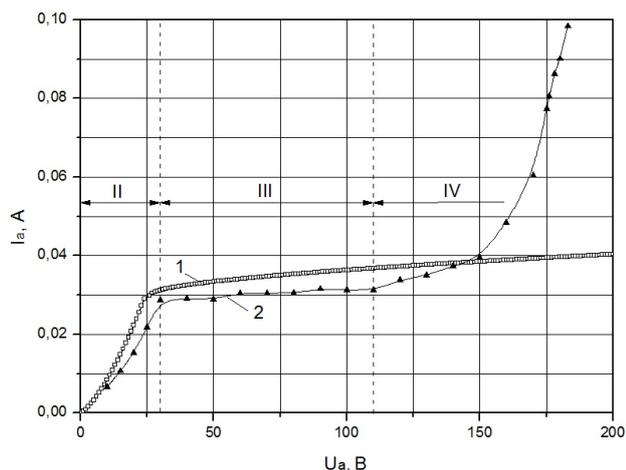


Рис. 4 – Теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) анодные характеристики диодов, соответствующие области пространственного заряда (область II), области насыщения (область III) и области аномального роста анодного тока (область IV)

следствие, переходом работы диода из режима насыщения (область III) в режим аномального роста анодного тока (область IV).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально обнаруженная в диоде с разрезным анодом область аномального роста анодного тока дополняет существующее представление о возможном поведении анодного тока в диодных структурах. Возможность появления данного эффекта следует учитывать при проектировании различных вакуумных приборов с улучшенными выходными параметрами. В частности, это касается магнетронов, конструкция которых представляет собой диодную структуру, и исследований, направленных на улучшение их частотных характеристик с целью расширения функциональных возможностей данных приборов.

The Anomalous Increasing of the Anode Current in the Diode Structures

G.I. Churyumov, A.I. Ekezi

Kharkov National University of Radioelectronics, 14, Lenina Av., 61166 Kharkov, Ukraine

This paper discusses the issues of current flow in the diode structures with an oxide cathode. Have been analyzed of theoretical and experimental anode characteristics of cylindrical diodes with a split anode. It is shown that in the range of anode voltage greater than the maximum observed effect of spontaneous growth of the anode current and increases the discrepancy between theoretical and experimental characteristics of diode structures. It was established that at this voltage occurs electron-stimulated desorption of ions from the anode surface with subsequent bombardment of the cathode, which causes secondary electron emission and additional growth of the anode current. This process is accompanied by a considerable increase in the temperature of the anode due to electron bombardment of the surface.

Keywords: Diode, Anode voltage, Oxide cathode, Secondary electron emission, Anode current, Magnetron, Space charge region, Saturation region.

Ефект аномального збільшення анодного току у діодних структурах

Г.І. Чурюмов, А.І. Екезі

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Леніна, 14, 61166 Харків, Україна

У даній роботі розглядаються питання токопроходження в діодних структурах з оксидним катодом. Проведено аналіз теоретичних і експериментальних анодних характеристик циліндричних діодів з розрізним анодом. Показано, що в області значень анодної напруги більше максимального спостерігається ефект самовільного зростання анодного струму і збільшення розбіжності між теоретичними і експериментальними характеристиками діодних структур. Встановлено, що при цій напрузі відбувається електронно-стимульована десорбція іонів з поверхні анода з подальшим їх бомбардуванням катода, що викликає вторинну електронну емісію та додаткове зростання анодного струму. Даний процес супроводжується значним збільшенням температури анода, обумовленої бомбардуванням електронами його поверхні.

Ключові слова: Діод, Анодна напруга, Оксидний катод, Вторинна електронна емісія, Анодний струм, Магнетрон, Область просторового заряду, Область насичення.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Э.Ю. Клейнер, *Основы теории электронных приборов* (Москва: Высшая школа: 1974).
2. Б.М. Царев, *Расчет и конструирование электронных ламп* (Москва: Энергия: 1967).
3. Л.Н. Добрецов, Л.Н. Гомоюнов, *Эмиссионная электроника* (Москва: Наука: 1966).