

УДК 621.382.2/.3

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВАКУУМНОГО ПЛАНАРНОГО ТРИОДА

Н.Ф. СТОЛЯР, А.Л. ДАНИЛЮК, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 2 октября 2017*

**Аннотация.** В данной работе произведено моделирование анодных и сеточных характеристик для твердотельного вакуумного микроразмерного твердотельного триода. Было произведено сравнение экспериментальных и рассчитанных характеристик. Рассчитаны зависимости для крутизны и внутреннего сопротивления структуры. Определен коэффициент усиления микротриода.

*Ключевые слова:* микроэлектроника, вакуумный микротриод, полевая эмиссия.

**Abstract.** Modeling of anode and gate characteristics of solid-state vacuum microtriode was made in this work. The calculated characteristics were compared with experimental ones. Dependencies of steepness and internal resistance were calculated. Microtriode gain was found.

*Keywords:* microelectronics, vacuum microtriode, field emission.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 110, No. 8, pp. 41-47**  
**Electrical characteristics of vacuum planar triode with four electrodes**  
**M.F. Stoliar, A.L. Daniliuk, V.E. Borisenko**

### Введение

К 1980-м годам полупроводники вытеснили вакуумные лампы из электроники благодаря своей технологичности, миниатюрности, экономичности, невысокой стоимости и низкому энергопотреблению. Однако в настоящее время частотные характеристики полупроводниковых приборов приближаются к своему пределу и актуальность альтернативных электронных приборов с каждым годом возрастает.

Несмотря на указанные выше преимущества, полупроводники все же не являются идеальной средой для переноса носителей заряда. При протекании тока в полупроводниках происходит рассеяние носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки и ее дефектах. В то время как в вакууме возможен перенос носителей заряда без существенного рассеяния. Максимальная скорость движения носителей заряда в полупроводниках составляет  $5 \cdot 10^5$  м/с, а скорость электронов в вакууме теоретически может достигать  $3 \cdot 10^8$  м/с. Кроме того, вакуумные устройства более устойчивые, чем полупроводниковые приборы, к экстремальным условиям, например, для работы при повышенных температурах и воздействии радиации [1].

На данный момент в большинстве современных вакуумных ламп, которые все еще применяются в мощных радиосистемах, используется термоэлектронная эмиссия. Такой тип эмиссии требует больших энергозатрат, затрудняет использование вакуумных ламп в маломощных системах. Однако была найдена возможность совместить достоинства приборов обоих типов при миниатюризации триода в микромасштабе [1, 2, 4–7].

Целью данной работы является разработка модели, позволяющей прогнозировать электрические характеристики вакуумных твердотельных триодов в зависимости от размеров составляющих их элементов.

## Описание структуры

В качестве объекта моделирования выбрана экспериментальная структура, описанная в [2]. Она содержит катод, анод и два управляющих электрода (рис. 1). Электроды состоят из адгезионного и эмиссионного слоев. Эмиссионный слой выполнен из пленки золота толщиной 300 нм. Оба слоя осаждаются на кремниевую подложку, после чего с помощью литографии формируется рисунок структуры. Расстояние между катодом и анодом – 90 мкм, между управляющими электродами – 270 мкм. Горизонтальная ось симметрии управляющих электродов удалена от катода на 40 мкм. Для избежания столкновения носителей заряда с молекулами воздуха во время экспериментальных измерений структура помещалась в вакуумную камеру с давлением  $10^{-3}$  Па. Для данной структуры в ходе экспериментальных измерений в [2] были получены анодные характеристики (зависимость анодного тока от разности потенциалов анод-катод), что важно для оценки адекватности предлагаемой модели.

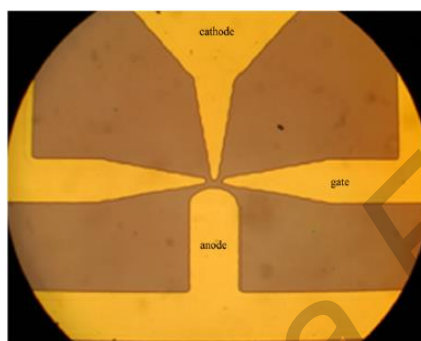


Рис. 1. Структура вакуумного микротриода

## Методика расчета вольт-амперных характеристик вакуумной планарной микроструктуры

Для расчета вольт-амперных характеристик необходимо было решить следующие задачи: 1) найти распределение напряженности электрического поля в зависимости от величин потенциалов на электродах структуры с использованием уравнения Лапласа; 2) определить эмиссионный ток на катоде с помощью уравнения Фаулера-Нортгейма; 3) рассчитать траектории эмиттированных электронов с помощью уравнения Лоуренса для действующей на электроны силы со стороны электрического поля в зазоре и Второго закона Ньютона, а далее определить долю электронов, которая достигнет анода. Определив долю электронов, достигших анода, можно найти анодный ток.

Для расчета распределения напряженности электрического поля уравнение Лапласа решали методом конечных элементов, где в качестве граничных условий брали потенциалы на электродах структуры:

$$\vec{E} = -\nabla V, \quad (1)$$

здесь  $V$  – электростатический потенциал;  $E$  – вектор напряженности электростатического поля.

В результате решения уравнения Лапласа получили карту распределения напряженности электростатического поля в структуре (рис. 2). Зная напряженность электростатического поля вблизи катода, используя формулу Фаулера-Нортгейма, рассчитывали плотность тока на поверхности катода [5]:

$$J = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \Phi t^2(y)} \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m}\sqrt{\Phi^3}v(y)}{3heE}\right), \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $E$  – напряженность электрического поля на катоде;  $h$  – постоянная Планка;  $\Phi$  – работа выхода материала катода;  $m$  – эффективная масса электрона в материале катода;  $t(y)$  и  $v(y)$  – функции Нортгейма аргумента  $y$ .

$$y = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0 \Phi^2}}. \quad (3)$$

Проинтегрировав плотность тока по поверхности катода, получили ток эмиссии:

$$I_c = \int_S J ds. \quad (4)$$

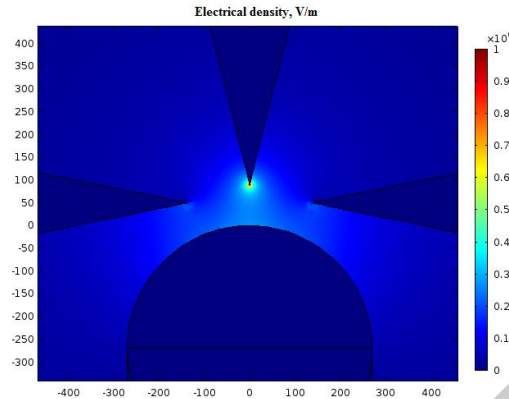


Рис. 2. Распределение напряженности электростатического поля в микроразмерной структуре при  $U_{ac} = 30$  В и  $U_g = -15$  В

Для определения анодного тока необходимо рассчитать траектории движения электронов, которые эмитированы катодом, а затем найти, какая их часть достигнет анода. Для этого решали следующее уравнение:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{eE}{m_0}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость движения электрона;  $t$  – время;  $m_0$  – масса покоя электрона.

Начальные скорости электронов принимали равными нулю. Распределение сгенерированных электронов по поверхности катода пропорционально плотности эмиссионного тока. После построения траекторий (рис. 3) и вычисления количества электронов, которые попали на анод, получили анодный ток.

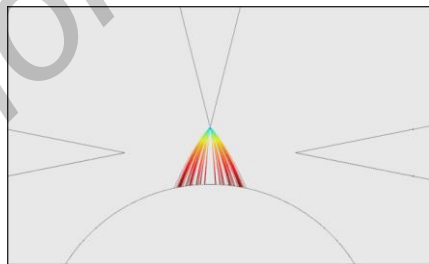


Рис. 3. Траектории движения электронов в моделируемом триоде

Для корректировки отклонений расчетных от экспериментальных данных был введен специальный коэффициент пропорциональности  $\kappa$ , определяемый соотношением

$$I_{\text{экс}} = \kappa \cdot I_{\text{рас}}. \quad (6)$$

В данной модели анод подключался к заземленной шине, т. е. потенциал анода равен нулю.

### Результаты расчета характеристик структуры

В результате расчетов получили анодные характеристики для рассмотренной структуры. При сравнении рассчитанных данных с экспериментальными значениями был определен поправочный коэффициент  $\kappa$ . Для наглядности на рис. 4 для каждого из рассмотренных сеточных

потенциалов  $U_g$  были представлены: зависимости, полученные экспериментально; полученные в ходе расчетов; зависимости с учетом поправочного коэффициента.

В ходе расчетов было установлено, что максимальное отклонение экспериментальных данных от расчетных было при нулевом потенциале на управляющих электродах. Для этого случая значение поправочного коэффициента составило  $\kappa = 5$  (рис. 4, а). При уменьшении потенциала на управляющих электродах экспериментальные данные приближаются к расчетным, а поправочный коэффициент приближается к единице. При  $-20$  В поправочный коэффициент становится равным единице (рис. 4, з), а при дальнейшем уменьшении потенциалов на управляющих электродах практически не меняется (рис. 4, д).

Отклонение расчетных данных от экспериментальных можно объяснить тем, что после изготовления триода могли оставаться заусенцы, микровыступы и неровности, на которых могла концентрироваться напряженность электрического поля. Также в материале, из которого была выполнена структура, могли содержаться примесные центры. Такие места могут стать дополнительными источниками эмиссии, что увеличит катодный и, как следствие, анодный ток.

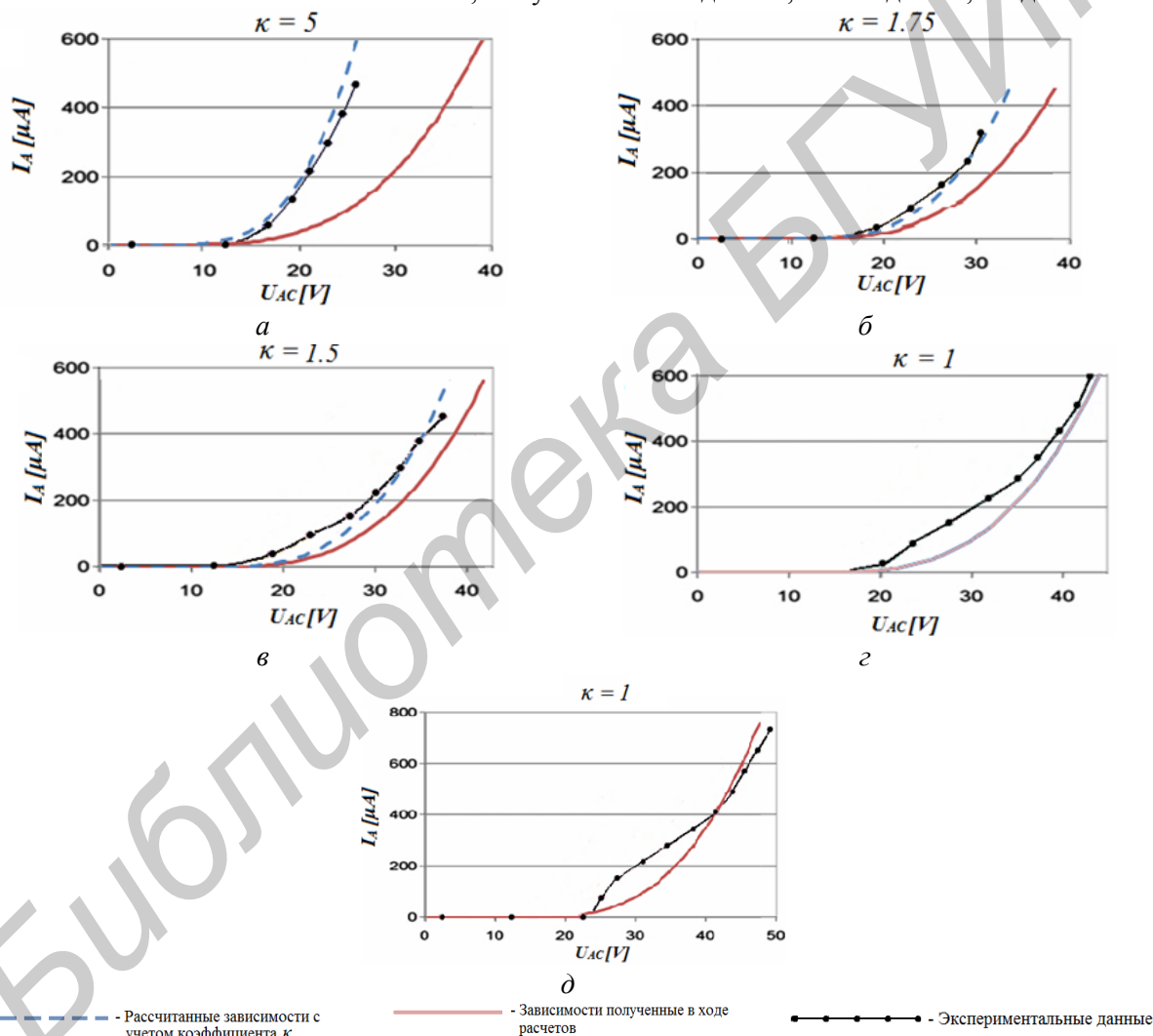


Рис. 4. Сравнение рассчитанных и экспериментальных анодных характеристик структуры при  $U_g = 0$  В (а),  $-10$  В (б),  $-15$  В (в),  $-20$  В (з),  $-25$  В (д)

По полученным анодным характеристикам было рассчитано внутренне сопротивление структуры, которое уменьшается по мере возрастания разности потенциалов анод-катод. Полученные зависимости сопротивления представлены на рис. 5. Ввиду того, что вакуум является идеальным диэлектриком, сопротивление структуры при разности потенциалов анод-катод до  $10$  В стремится к очень большим значениям, при которых в структуре не протекает ток, что можно увидеть на рис. 5. При наращивании разности потенциалов анод-катод энергетический барьер понижается, и сопротивление структуры, соответственно, тоже уменьшается.

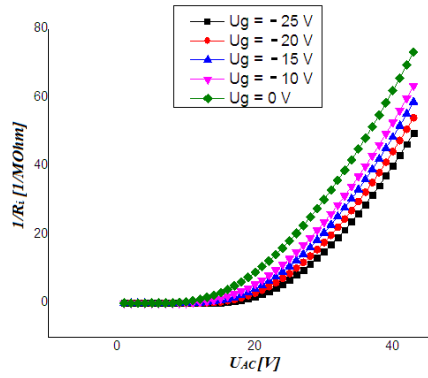


Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления структуры от разности потенциалов анод-катод

Используя рассмотренную модель, были получены сеточные характеристики структуры (зависимость анодного тока от потенциалов на управляющих электродах). Сеточные характеристики представлены на рис. 6, а их крутизна – на рис. 7.

Исходя из полученных в работе [2] экспериментальных данных, реальные характеристики имеют бóльшую крутизну. Это происходит при преодолении значения потенциала на управляющих электродах в  $-20$  В, как уже говорилось выше, ввиду активации дополнительных центров эмиссии на катоде. По мере увеличения разности потенциалов крутизна сеточных характеристик увеличивается. Однако при достижении некоторого значения происходит их снижение из-за того, что все большая часть электронов попадает на управляющие электроды, которые в некоторый момент сами начинают выполнять роль анодов.

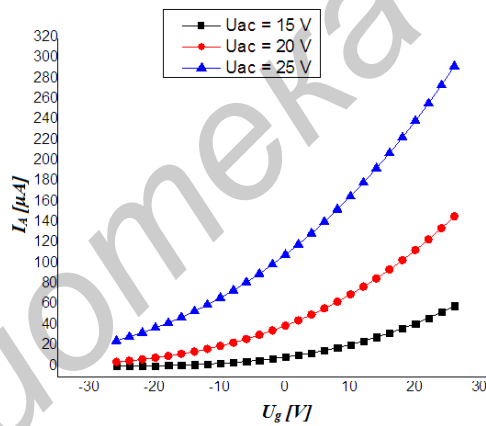


Рис. 6. Рассчитанные сеточные вольт-амперные характеристики структуры

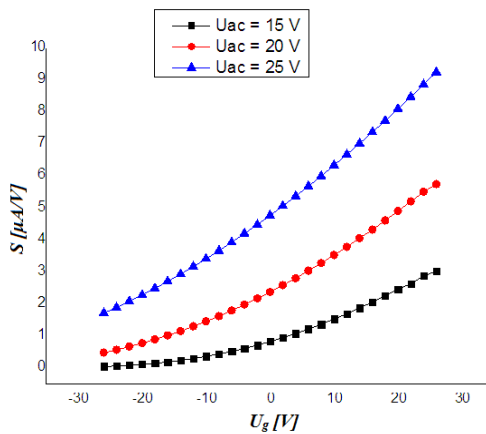


Рис. 7. Зависимости крутизны вольт-амперной характеристики структуры от значения потенциала на управляющих электродах

Судя по полученным зависимостям (рис. б), следует искать компромиссное решение в выборе рабочего режима триода в случае использования его в реальных структурах. Если выбрана слишком большая разность потенциалов анод-катод, то для «запирания» триода потребуется подать слишком большой потенциал на управляющие электроды. Однако если использовать слишком маленькую разность потенциалов, то на выходе структуры получится маленьких выходной ток.

Используя выражение  $\mu = S \cdot R_i$  (где  $S$  и  $R_i$  – соответственно крутизна вольт-амперной характеристики и сопротивление триода при заданных  $U_g$  и  $U_{ac}$ ), был получен коэффициент усиления триода  $\mu = 0,26$ .

### Заключение

Предложена модель и рассчитаны анодные и сеточные вольт-амперные характеристики твердотельной планарной микроразмерной вакуумной триодной структуры, из которых получены внутреннее сопротивление и крутизна. В ходе сравнения имеющихся экспериментальных и расчетных данных установлено, что экспериментальный анодный ток имеет бóльшие значения при тех же значениях  $U_{ac}$ . Однако при увеличении отрицательного потенциала на управляющих электродах разница между расчетным и экспериментальным токами уменьшается. При  $U_g = -20\text{В}$  расчетные характеристики практически не отличаются от экспериментальных. Представленная модель может быть использована при разработке устройств вакуумной электроники.

### Список литературы

1. Jin-WooHan, JaeSubOh, Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100. P. 213505.
2. Tomasz Grzebyk, Anna Gorecka-Drzazga. Field-emission electron source for vacuum micropump // *Vacuum*. 2011. Vol. 86. P. 39–43.
3. Kenji Natori. Ballistic/quasi-ballistic transport in nanoscale transistor // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 6194–6198.
4. Gallyamov Z.R., Nikiforov K.A. Model of electron transport in cell of a thin-film vacuum nanotriode // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 541. P. 012035.
5. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия // *Соровский образовательный журнал*. 2000. Т. 6, № 11. С. 96–103.
6. Seok Woo Lee, Seung S. Lee, Eui-Hyeok Yang. A Study on Field Emission Characteristics of Planar Graphene Layers Obtained from a Highly Oriented Pyrolyzed Graphite Block // *Nanoscale Res Lett*. DOI 10.1007/s11671-009-9384-9.
7. Nitrogen-incorporated nanodiamond vacuum field emission transistor with vertically configured self-aligning gate/ S.H. Hsu [et al.] // *Diamond & Related Materials*. 2012. Vol. 22. P. 142–146.

### References

1. Jin-WooHan, JaeSubOh, Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100. P. 213505.
2. Tomasz Grzebyk, Anna Gorecka-Drzazga. Field-emission electron source for vacuum micropump // *Vacuum*. 2011. Vol. 86. P. 39–43.
3. Kenji Natori. Ballistic/quasi-ballistic transport in nanoscale transistor // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 6194–6198.
4. Gallyamov Z.R., Nikiforov K.A. Model of electron transport in cell of a thin-film vacuum nanotriode // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 541. P. 012035.
5. Fursej G.N. Avtoelektronnaja jemissija // *Sorovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. 2000. T. 6, № 11. S. 96–103. (in Russ.)
6. Seok Woo Lee, Seung S. Lee, Eui-Hyeok Yang. A Study on Field Emission Characteristics of Planar Graphene Layers Obtained from a Highly Oriented Pyrolyzed Graphite Block // *Nanoscale Res Lett*. DOI 10.1007/s11671-009-9384-9.
7. Nitrogen-incorporated nanodiamond vacuum field emission transistor with vertically configured self-aligning gate/ S.H. Hsu [et al.] // *Diamond & Related Materials*. 2012. Vol. 22. P. 142–146.

### **Сведения об авторах**

Столяр Н.Ф., м.т.н., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Данилюк А.Л., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борисенко В.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровка, д. 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-33-674-78-01;  
e-mail: n.stolyar@list.ru.  
Столяр Николай Федорович

### **Information about the authors**

Stoliar M.F., master of engineering, PG student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Daniliuk A.L., PhD, associate professor, associate professor of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borisenko V.E., D.Sci., professor, head of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-33-674-78-01;  
e-mail: n.stolyar@list.ru.  
Stoliar Mikalai Fedaravich