

## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО НАНОТРИОДА

Жамойть А.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук

Аннотация. Представлены результаты моделирования статических (сеточной и анодной) характеристик нанотриода на основе уравнения Фаулера-Нордгейма. Установлены закономерности их изменения от варьирования напряжения на аноде и сетке. Рассчитаны крутизна нанотриода, его внутренне сопротивление и коэффициент усиления. Установлено, что крутизна составляет единицы нА/В, внутренне сопротивление достигает 27 ГОм, а коэффициент усиления равен 4.

В настоящее время активно развивается вакуумная наноэлектроника, использующая наноструктуры с вакуумными промежутками. В таких наноструктурах применяются катоды с холодной эмиссией [1]. Их преимущество заключается в отсутствии необходимости создавать вакуум путем откачки и нагревать катоды. К тому же в вакууме возможен перенос носителей заряда без существенного рассеяния и скорость переноса электронов существенно выше, чем в полупроводниках. Кроме того, вакуумные устройства более устойчивы, чем полупроводниковые приборы, к экстремальным условиям, например, для работы при повышенных температурах и воздействии различного рода излучений и радиации [2].

При уменьшении расстояния между электродами возникает возможность осуществления автоэлектронной эмиссии [1, 2], так как за счет малых расстояний появляется высокая напряженность электрического поля при сравнительно низких потенциалах на электродах. Кроме того, если расстояние между электродами меньше длины свободного пробега электрона в воздухе, то перенос электронов в структуре может быть осуществлен посредством баллистического транспорта [3]. При этом для работы самой структуры не потребуется откачка лишнего воздуха.

Таким образом, можно получить прибор, который будет аналогичен по своим свойствам вакуумной лампе, где вместо термоэлектронной эмиссии осуществляется автоэлектронная (полевая) эмиссия, а для обеспечения баллистического транспорта используется малое расстояние между электродами, а не создается вакуум в рабочей области структуры. В свою очередь, такие структуры можно выполнить по планарной полупроводниковой или МЭМС технологии.

Целью работы является моделирование статических электрических характеристик вакуумного нанотриода, конструкция которого рассмотрена ниже.

**Конструкция.** В данной работе рассмотрена конструкция планарного вакуумного нанотриода, состоящего из катода, анода и двух управляющих электродов (Gate).

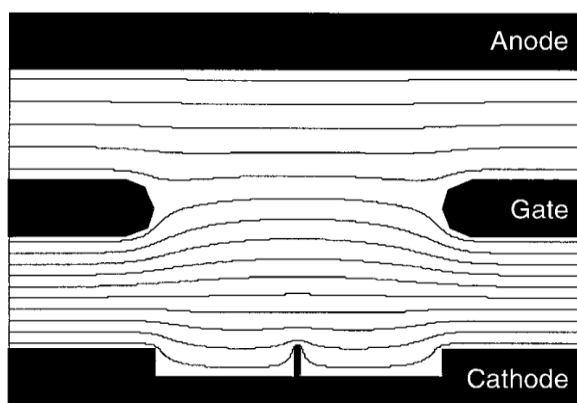


Рисунок 1 – Геометрия нанотриода с изображением эквипотенциальных кривых, рассчитанных с помощью уравнения Пуассона [4]

**Модель.** Для моделирования использовались результаты расчета распределения напряженности электрического поля в нанотриоде, полученные с помощью решения двумерного уравнения Пуассона [4]. На основе полученных данных найдена аппроксимация величины напряженности электрического поля на поверхности катода в виде

$$F = gV_g + hV_a \quad (1)$$

где  $V_g$  и  $V_a$  напряжение на затворе и аноде соответственно,  $g$  и  $h$  – параметры, определяемые конкретной геометрией электродов ( $g > h$ ).

Для расчета эмиссионного тока используем модель автоэлектронной эмиссии Фаулера – Нордгейма [4]

$$I = \frac{\lambda a s F^2}{\varphi} \exp\left(\frac{-\mu b \varphi^2}{F}\right) \quad (2)$$

где  $s$  – площадь эмиссии,  $\varphi$  – работа выхода материала катода. Константы  $a=1.541 \cdot 10^{-6}$  эВ/В<sup>2</sup>,  $b=6.83 \cdot 10^9$  В/(м эВ<sup>3/2</sup>). Параметры  $\lambda=(1.1)^{-1}$  и  $\mu=(0,95 \cdot y^2)$ , где функция  $y = (e/4\pi\epsilon_0)^{1/2} F^{1/2}/\varphi$  эквивалентна снижению работы выхода. Здесь  $e$  – заряд электрона,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума. С помощью соотношений (1), (2) проведены расчеты сеточной  $I(V_g)$  и анодной  $I(V_a)$ , рис.2а, характеристик нанотриода, а также крутизны  $S=dI(V_g)/dV_g$  при  $V_a=\text{const}$ , внутреннего сопротивления  $R=dI(V_a)/dV_a$  при  $V_g=\text{const}$ , рис.2б и коэффициента усиления  $k=SR$ . Значения параметров  $g = 4 \cdot 10^8$  м<sup>-1</sup>,  $h = 1 \cdot 10^8$  м<sup>-1</sup>. Характерные значения напряженности электрического поля на поверхности катода  $F$  составляют порядка  $10^9$  В/м.

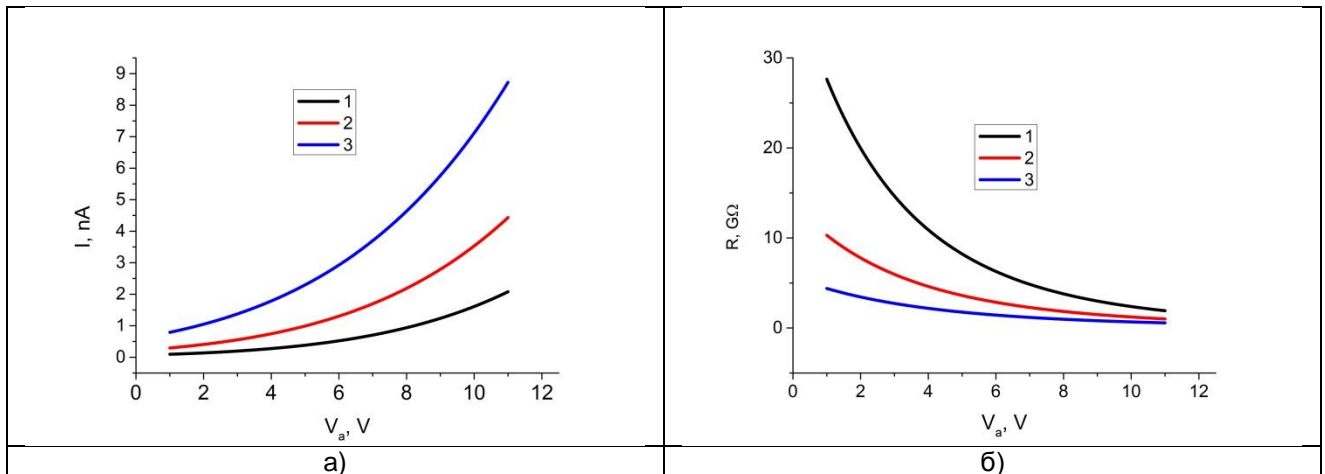


Рисунок 2 – Анодная характеристика (а) и внутренне сопротивление (б) нанотриода:  
1 -  $V_g=10,2$  В, 2 -  $V_g=11,0$  В, 3 -  $V_g=11,8$  В

**Результаты расчетов.** Установлено, что при приложении потенциалов в области  $V_g=5-11$  В,  $V_a=1-11$  В, значения тока в структуре составляет 1-10 нА. Для сеточной и анодной характеристик наблюдается монотонный рост тока с увеличением, как потенциала анода, так и потенциала сетки. Величина крутизны лежит в области 0.5-4.5 нА/В и растет с ростом значений  $V_g$  и  $V_a$ . Значения внутреннего сопротивления составляет 2-27 ГОм, его величина падает с ростом значений  $V_g$  и  $V_a$ . Коэффициент усиления для данной конструкции составляет  $4 \pm 0.003$ .

**Закключение.** Рассмотрена конструкция вакуумного планарного нанотриода. Проведено моделирование его статических характеристик. Установлены закономерности изменения статических характеристик при варьировании сеточного и анодного потенциалов. Показано, что для данной геометрии нанотриода характерные токи составляют единицы нА, значения крутизны растут с ростом прикладываемых потенциалов, а внутреннее сопротивление соответственно падает. Для данной конструкции характерны малая крутизна и высокое внутренне сопротивление, достигающее нескольких ГОм, из-за нанометровых размеров и соответственно малых значений токов (единицы нА). В этом состоит специфика рассмотренной конструкции нанотриода и поэтому для встраивания подобных элементов в радиотехнические цепи и схемы необходимо разрабатывать соответствующие схемотехнические решения. Исследованная конструкция и полученные результаты расчетов могут быть использованы при разработке устройств вакуумной наноэлектроники.

**Список использованных источников:**

1. Han, Jin-Woo. Vacuum nanoelectronics: Back to future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor / Jin-Woo Han, Jae Sub Oh, M. Meeyappan // *Applied Physics Letters*, 2012. – P. 100.
2. Grzebyk, Tomasz. Field-emission electron source for vacuum micropump / Tomasz Grzebyk, Anna Gorecka-Drzazga // *Vacuum* 86, 2011. – P. 39.
3. Natori, Kenji. Ballistic/quasi-ballistic transport in nanoscale transistor / Kenji Natori // *Applied Surface Science* 254, 2008. – P. 6194–6198.
4. Driskill-Smith, A.A.G. Quantum interference in a vacuum nanotriode/ A.A.G. Driskill-Smith, D.G. Hasko, H.Ahmed // *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2000. – P. 3481.