——— ПРИБОРЫ ——

УДК 621.38

# ПЛАНАРНЫЙ ТРИОД ДЛЯ ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2020 г. С. Ш. Рехвиашвили<sup>а,</sup> \*, Д. С. Гаев<sup>b</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, ул. Шортанова, 89А, г. Нальчик, 360000 КБР <sup>b</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, 360004 КБР

\*E-mail: rsergo@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2019 г. После доработки 28.10.2019 г. Принята к публикации 30.10.2019 г.

В работе изучается триод для вакуумной микроэлектроники с горизонтальной геометрией (планарный триод). Предложена простая теоретическая модель прибора и вычислено минимальное напряжение отсечки. Проведены эксперименты на принципиальной модели прибора, которые качественно подтвердили основные теоретические выводы.

*Ключевые слова:* вакуумная микроэлектроника, электронная эмиссия, планарный вакуумный триод, напряжение отсечки

DOI: 10.31857/S0544126920020076

### введение

Вакуумная микроэлектроника представляется перспективным направлением в создании быстродействующих и радиационно-стойких интегральных микросхем [1–7]. Несмотря на интенсивные теоретические и практические исследования, производство коммерчески доступных изделий вакуумной микроэлектроники до сих пор не налажено. Именно это обстоятельство вызывает и определенный скепсис по отношению к вакуумной микроэлектронике, так как ее развитие продолжается уже не одно десятилетие.

В качестве элементной базы для вакуумной микроэлектроники, как правило, рассматриваются вертикальные катодные структуры, получаемые с помощью напыления металлов, в частности молибдена. Для изготовления вертикальных катодов применяют также кремний, углеродные вискеры и однослойные и многослойные нанотрубки.

Предпринимаются попытки разработки, изготовления и экспериментальных исследований автоэмиссионных триодов с горизонтальной геометрией (планарных триодов) [8–11], которые, как предполагается, могут стать базовыми элементами для сверхбыстродействующих вакуумных микросхем, микросборок и составных структур. Главным их достоинством считается низкая электрическая емкость между катодом и управляющим электродом. По нашему мнению, для изготовления планарных эмиссионных структур в качестве основы можно рассматривать технологии многослойных структур "диэлектрик-металл" для оптических устройств и технологии многослойной металлизации в интегральных микросхемах. В данном случае также возникает привлекательная идея о создании объемных интегральных схем на планарных вакуумных триодах.

Надежная работа указанных приборов требует вакуумных условий. Если эмитированные электроны обладают достаточно большой кинетической энергией, то они способны ионизировать атомы остаточного газа. Последние, ускоряясь электрическим полем, будут бомбардировать катод и вызывать его деградацию. Следовательно, размер эмиссионных структур необходимо выбирать с учетом степени их вакуума, чтобы не было столкновений при пролете электронов через канал триода. В идеале длина канала не должна превышать длину свободного пробега электрона при заданном значении давления остаточных газов.

Учитывая большой интерес ко всем перечисленным вопросам, целью настоящей статьи являлось изучение работы планарного триода для вакуумной микроэлектроники. В работе ставятся и решаются следующие задачи: 1) разработка простой теоретической модели планарного триода; 2) экспериментальное исследование особенностей работы принципиальной модели планарного триода.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим движение электрона в вакуумном канале планарного триода. Система координат и



Рис. 1. Канал планарного вакуумного триода.

траектория движения электрона показаны на рис. 1. Электрон влетает в канал в точке с координатами  $(0, y_0)$  с начальной скоростью  $v_0$ . Движение электрона внутри канала происходит в скрещенных электрических полях  $E_x$  и  $E_y$ , которые создаются анодом и управляющим электродом. При определенных напряжениях на управляющем электроде  $U_{\perp}$  и аноде  $U_{\parallel}$  должно происходить замыкание траектории электронов на управляющий электрод. Поэтому при некотором критическом значении напряжения на управляющем электроде  $U_{\perp}$  и заданном значении анодного напряжения  $U_{\parallel}$  ток электронов через канал должен быть равен нулю. Такой режим советует режиму отсечки триода.

Запишем систему уравнений движения электрона в плоском вакуумном канале триода

$$m\ddot{x} = qE_x, \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = v_0,$$
 (1)

$$n\ddot{y} = qE_y, \quad y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) = 0,$$
 (2)

где *q* и *m* – заряд и масса электрона. Решение системы (1) и (2) имеет вид

$$x(t) = \frac{qE_x}{2m}t^2 + v_0t,$$
 (3)

$$y(t) = \frac{qE_y}{2m}t^2 + y_0.$$
 (4)

Исключив из (3), (4) время, получаем основное уравнение для траектории электрона

$$x(y) = \frac{E_x}{E_y}(y - y_0) + v_0 \sqrt{\frac{2m(y - y_0)}{qE_y}}, \quad y_0 \le y \le H.$$
(5)

Напряжения  $U_{\perp}$  и  $U_{\parallel}$ , при которых возникает режим отсечки, соответствуют условиям x = L, y = H и  $y_0 = 0$ . С учетом этих условий из (5) находим

$$U_{\parallel} = \left(\frac{L}{H}\right)^2 \left(U_{\perp} - \sqrt{U_0 U_{\perp}}\right), \quad U_0 = \frac{2mv_0^2}{q} \left(\frac{H}{L}\right)^2. \tag{6}$$

Начальную скорость электронов можно оценить по формуле:  $v_0 = j/(qn)$ , где j – плотность эмиссионного тока катода, n – объемная концентрация эмитированных электронов. Если эта скорость мала, то из (6) получается простая формула

$$U_{\perp} = \left(\frac{H}{L}\right)^2 U_{\parallel}.$$
 (7)

Для планарного триода формула (7) связывает напряжения  $U_{\perp}$  и  $U_{\parallel}$  с размерами канала при его работе в самом начале режима отсечки. Отметим, что формула не учитывает возможные токи утечки, которые протекают вне канала, но тем не ме-



**Рис. 2.** Схема подключения функциональных узлов однолучевой трубки 11ЛО2И в эксперименте: 1 – подогреватель катода; 2 – катод; 3 – модулятор; 4, 5 – аноды; 6, 7 – сигнальные отклоняющие пластины; 8 – экран; 9 – измеритель характеристик ППП Л2-56.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 49 № 3 2020



Рис. 3. Геометрия сигнальных пластин.





**Рис. 4.** Зависимость тока в цепи электрода сигнальной пластины от потенциала смещения на управляющем электроде 6 (*a*) и визуализация электронного луча на экране осциллографа (*б*).

нее ею можно пользоваться при проектировании конструкций планарных триодов.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальное моделирование работы планарного триода проводили на конструкционной базе однолучевой трубки 11ЛО2И. Схема

подключения функциональных узлов трубки показана на рис. 2. Геометрия сигнальных пластин показана на рис. 3. Максимальная энергия электронов в пучке на входе в зону сигнальных пластин (см. рис. 3, точка "а") составляла 1900 эВ. Смещение на сигнальные пластины и измерение тока в цепи управляющих электродов осуществлялось в режиме утечки на приборе ППП Л2-56. На рис. 4 приведена зависимость тока в цепи управляющих электродов от потенциала смещения. Там же приведены снимки изображения электронного пучка на экране осциллографа, соответствующие различным потенциалам смещения.

Было обнаружено, что при потенциале смещения более 100 В ток электронного пучка полностью замыкается на электрическую цепь сигнальных пластин. По расчетной формуле (7) минимальный потенциал смещения, при котором начинается режим отсечки, составляет 41 В. Полученный в эксперименте достаточно широкий диапазон значений управляющего напряжения в режиме отсечки (более 50 В) объясняется наличием пространственного распределения электронного пучка и токами утечки в отличие от идеальной модели. Представляет большой интерес экспериментальная проверка формулы (7) на реальных интегральных вакуумных структурах, для которых можно ожидать существенного сужения области отсечки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование особенностей функционирования модели планарного вакуумного триода. По результатам исследований можно сделать вывод о том, что прибор потенциально пригоден для применения в качестве активного элемента в вакуумной микроэлектронике. С нашей точки зрения, основными негативными факторами оказываются большой интервал напряжений режима отсечки и разогрев триода. В частности, в цифровых интегральных микросхемах на планарных вакуумных триодах это будет приводить к нежелательному увеличению диапазона напряжений переключения логических элементов и проблемам нагрева и эффективного теплоотвода. К достоинствам планарных вакуумных триодов можно отнести возможность применения для их изготовления стандартных и хорошо отработанных технологий многослойной металлизации, а также заманчивую перспективу изготовления объемных интегральных микросхем на их основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brodie I., Spindt C.A. Vacuum Microelectronics // Advances in Electronics and Electron Physics. 1992. V. 83. P. 1–106.
- Brodie I., Schwoebel P.R. Vacuum Microelectronic Devices // Proc. IEEE. 1994. V. 82. № 7. P. 1006–1034.
- Schwoebel P.R., Brodie I. Surface-science aspects of vacuum microelectronics // J. Vac. Sci. Technol. B. 1995. V. 13. P. 1391–1410.
- 4. *Busta H.H.* Vacuum Microelectronics // J. Micromech. Microeng. 1992. № 2. P. 43–74.
- 5. Vacuum Microelectronics. Ed. Wei Zhu. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 396 p.
- 6. Татаренко Н.И., Кравченко В.М. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: Физматлит., 2006. 192 с.
- 7. Смолин В.К., Шоболов Е.Л. Вакуумная микроэлектроника: перспективный путь создания элементной компонентной базы для эксплуатации в экстремальных условиях // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 227–234.
- Subramanian K., Kang W.P., Davidson J.L., Hofmeister W.H., Choi B.K., Howell M. Nanodiamond planar lateral field emission diode // Diamond & Related Materials. 2005. V. 14. P. 2099–2104.
- Song X., Gao J., Fu Q., Xu J., Zhao Q., Yu D. Novel planar field emission of ultra-thin individual carbon nanotubes // Nanotechnology. 2009. V. 20. № 40. P. 405208(1–7).
- Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 213505(1–4).
- Han J.-W., Moon D., Meyyappan M. Nanoscale Vacuum Channel Transistor // Nano Lett. 2017. V. 17. № 4. P. 2146–2151.