

*Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 275–284, 2023.

*Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 275—284.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21

УДК 621.382.323

# Полевой транзистор с металлическим затвором

Обухов И. А.

*Научно-производственное предприятие «Радиотехника»*

*г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация*

*iao001@mail.ru, ia@nprpt.ru*

Получено: 27 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

**Аннотация:** *Представлена конструкция и описан принцип функционирования полевого транзистора на основе полупроводникового нанопровода с затвором из металла. Оценена подпороговая крутизна прибора и показано, что она может превышать термоэмиссионный предел (значение  $e/k_B T$ ).*

**Ключевые слова:** *полевой транзистор, нанопровод, размерное квантование, металлический затвор.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Обухов И. А. Полевой транзистор с металлическим затвором // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 275—284.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Обухов, И. А. Полевой транзистор с металлическим затвором / И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 275—284.

## 1. Введение

Последние двадцать лет разработчики компонентной базы цифровой электроники активно предлагают и исследуют разнообразные модификации полевых транзисторов, такие как *FinFET*, *GAA FET*, *MBCFET*, *Nanosheet FET*, *NCTFET* и т. д. [1]. Целью этих работ является повышение быстродействия приборов типа металл — окисел — полупроводник (МОП) или металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) путем увеличения их крутизны. Судя по наблюдающейся уже более десяти лет стагнации скоростных характеристик кремниевых цифровых схем, прорывных результатов на этом пути пока получить не удалось.

Суть проблемы достаточно проста [2]. Для повышения производительности процессора необходимо увеличение количества транзисторов.

При этом необходимо не увеличить, а по возможности уменьшить, массу и габариты микросхемы. Поэтому транзистор должен быть как можно меньше. Уменьшение площади сечения канала полевого транзистора приводит при фиксированной плотности тока к снижению полного тока через него, то есть к уменьшению крутизны. Повышение плотности тока без увеличения подвижности носителей заряда, а подвижность при уменьшении размеров не увеличивается, ведет к увеличению тепловыделения и еще большему снижению крутизны за счет уменьшения подвижности с ростом температуры.

Повысить крутизну можно путем увеличения ширины затвора. Именно эта идея лежит в основе большинства современных модификаций полевых транзисторов. Но ширина затвора ограничена периметром поперечного сечения канала транзистора.

Также повысить крутизну полевых транзисторов можно, уменьшая длину канала и/или увеличивая емкость МОП или МДП конденсатора. Но и эти способы наталкиваются на серьезные ограничения.

В данной работе предлагается специальная конструкция полевого транзистора, которая для повышения его крутизны позволяет использовать явление размерного квантования энергии электронов в металле.

## 2. Конструкция и принцип функционирования транзистора

На рис. 1 и 2 показана конструкция предлагаемого полевого транзистора с металлическим затвором (ПТМЗ). Он представляет собой нанопровод (канал) с двумя омическими контактами (исток и сток) и вставкой из металла посередине (область затвора), а также два контакта к затвору, отделенных от него диэлектриком. Для оценок выбирались конкретные материалы элементов прибора, показанные на рисунках.

Нанопровод должен быть достаточно тонким и за счет размерного квантования обеспечивать малую концентрацию собственных электронов в канале и высокий потенциальный барьер Шоттки (порядка 1 эВ со стороны металла) на границах с областью затвора при нулевых  $V_g$  и  $V_{ds}$ .

Область затвора должна быть выполнена из металла с низкой концентрацией электронов проводимости, позволяющей эффективно управлять их концентрацией посредством изменения напряжения  $V_g$ .

Диэлектрик, отделяющий контакты затвора от области затвора, должен обеспечивать наличие достаточно высокого и широкого (ширина  $d_i$ ) потенциального барьера, предотвращающего утечки.

При приложении к контактам затвора отрицательного напряжения  $V_g$  у его краев появляются области пространственного заряда (ОПЗ) шири-

ной  $W$ , а электроны перемещаются к центру затвора. Суммарное количество электронов не изменяется, а их концентрация в центральной области затвора увеличивается за счет уменьшения занимаемого объема. Увеличение концентрации электронов в затворе приводит к повышению энергии Ферми в нем и уменьшению высоты потенциального барьера  $\Delta E$  для электронов между каналом и затвором. В результате, плотность тока  $J$  термоэлектронной эмиссии при ненулевых значениях напряжения  $V_{ds}$  оказывается функцией от  $V_g$ .

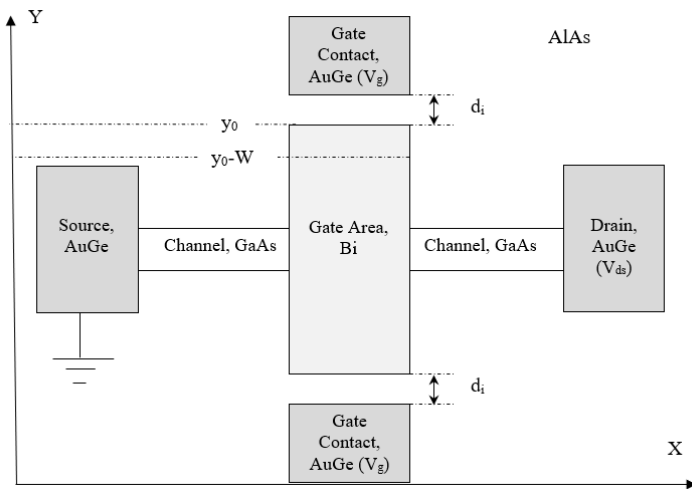


Рис. 1. Конструкция полевого транзистора с металлическим затвором.

Fig. 1. The design of the field-effect transistor with a metal gate

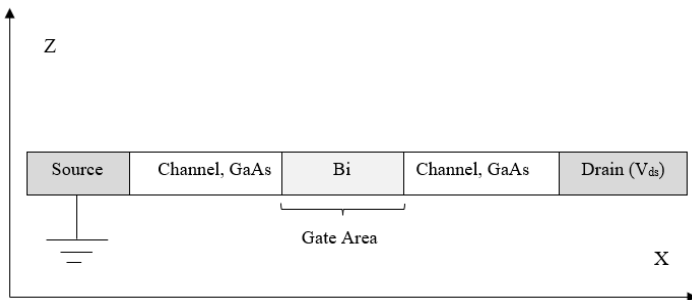


Рис. 2. Сечение прибора в плоскости XOZ.

Fig. 2. Cross section of the device in the XOZ plane

Справедлива простая оценка

$$\partial \ln J / \partial V_g = -V^{-1} \partial V / \partial V_g - (k_B T)^{-1} (\partial \Delta E / \partial V_g), \quad (1)$$

где:  $V$  — объем области затвора;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Считая, что область затвора представляет собой параллелепипед с длинами сторон  $L_{gx}$ ,  $L_{gz}$  и  $L$  по направлениям  $OX$ ,  $OZ$  и  $OY$  соответственно, можно получить приближенные выражения

$$V^{-1} \partial V / \partial V_g = -(2/(L - 2W)) \partial W / \partial V_g, \quad (2)$$

$$(\partial \Delta E / \partial V_g) = -(h/m_g) (\pi/3(n + n_1))^{1/3} (2m_g E_{gmin})^{1/2} (L - 2W)^{-3} \partial W / \partial V_g. \quad (3)$$

Здесь:  $h$  — постоянная Планка;  $m_g$  — эффективная масса электронов проводимости в затворе;

$$n = n_0 [L/(L - 2W)]; \quad (3)$$

$n_0$  — концентрация электронов в объемном материале затвора;

$$n_1 = (8\pi/3h^3) (2m_g E_{gmin})^{3/2}; \quad (4)$$

$$E_{gmin} = (h^2/8m_g) [1/L_{gx}^2 + 1/L_{gz}^2 + 1/(L - 2W)^2] \quad (5)$$

— минимальная энергия электронов в области затвора.

Из соотношений (1) — (5) следует формула

$$\partial \ln J / \partial V_g = (1/(L - 2W)) [2 + (k_B T)^{-1} (h/m_g) (\pi/3(n + n_1))^{1/3} (2m_g E_{gmin})^{1/2} (L - 2W)^{-2}] (\partial W / \partial V_g). \quad (6)$$

В этом выражении первое слагаемое в квадратной скобке соответствует чисто классическому изменению объема области затвора, занятой электронами, при изменении  $W$ . Второе слагаемое появляется из-за изменения в этой области минимальной допустимой энергии электронов и обусловлено ее размерным квантованием.

Используя одномерное уравнение Пуассона, нетрудно получить

$$\partial W / \partial V_g = (\varepsilon_i / d_i e n_0) [1 + (2\varepsilon_i^2 / \varepsilon e n_0 d_i^2) (\varphi - V_g)]^{-1/2}, \quad (7)$$

где:  $\varepsilon_i$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $e$  — элементарный заряд;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала затвора;

$$\varphi = -F/e + (3h^3(n + n_1)/8\pi)^{2/3} / 2m_g e \quad (8)$$

— электростатический, а  $F$  — химический потенциалы электронов в затворе.

Для того, чтобы подпороговая крутизна транзистора превысила термоэмиссионный предел, необходимо выполнение неравенства

$$\xi = (\partial \ln J / \partial V_g)(k_B T / e) =$$

$$= [\varepsilon_i / d_i e n_0 (L - 2W)(1 + (2\varepsilon_i^2 / \varepsilon e n_0 d_i^2)(\varphi - V_g))^{\frac{1}{2}}] \{2k_B T / e +$$

$$+ (h / m_g e)(\pi / 3(n + n_1))^{\frac{1}{3}}(2m_g E_{gmin})^{\frac{1}{2}}(L - 2W)^{-2}\} > 1. \quad (9)$$

Отметим, что второе, пропорциональное постоянной Планка слагаемое в фигурной скобке выражения (9), не зависит от температуры.

### 3. Результаты расчетов

Полученные аналитические выражения являются приближенными. Для более точного моделирования функционирования предлагаемого транзистора необходимо самосогласованное решение уравнений Шредингера, Пуассона и переноса в трехмерном стационарном случае. Оно может быть проведено, например, в рамках модели, описанной в работе [3]. Но и представленных здесь формул достаточно для предварительной оценки характеристик ПТМЗ.

Расчеты проводились в предположении, что  $T = 300^\circ K$  и  $L_{gx} = L_{gz} = 25$  нм,  $L = 44$  нм.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости ширины области обеднения  $W$  и концентрации  $n$  электронов проводимости в центре области затвора от напряжения на затворе  $V_g$ . При значениях  $V_g < -0,925$  В наблюдается резкое возрастание  $W$  и концентрации. Отметим, что аналогичный резкий рост концентрации электронов в тонких пленках висмута при уменьшении их толщины наблюдался экспериментально [4].

На рис. 5 представлена зависимость параметра  $\xi$  от  $V_g$  на начальном участке возрастания, который коррелирует с областью резкого роста концентрации электронов проводимости в центральной области затвора.

На рис. 6 показаны классический и квантовый вклады в величину  $\partial \ln J / \partial V_g$  в диапазоне напряжений на затворе от 0 В до  $-0,875$  В. Видно, что при  $V_g < -0,75$  В квантовый вклад в подпороговую крутизну транзистора начинает превышать классический, и дальнейший быстрый рост параметра  $\xi$  при убывании  $V_g$  связан именно с квантовым вкладом.

Поведение параметра  $\xi$  при всех значениях напряжений на затворе, при которых производились расчеты, представлено на рис. 7. Видно, что подпороговая крутизна рассматриваемого полевого транзистора при  $V_g < -0,93$  В может в десятки раз превышать термоэмиссионный предел (значение  $\xi = 1$ ).

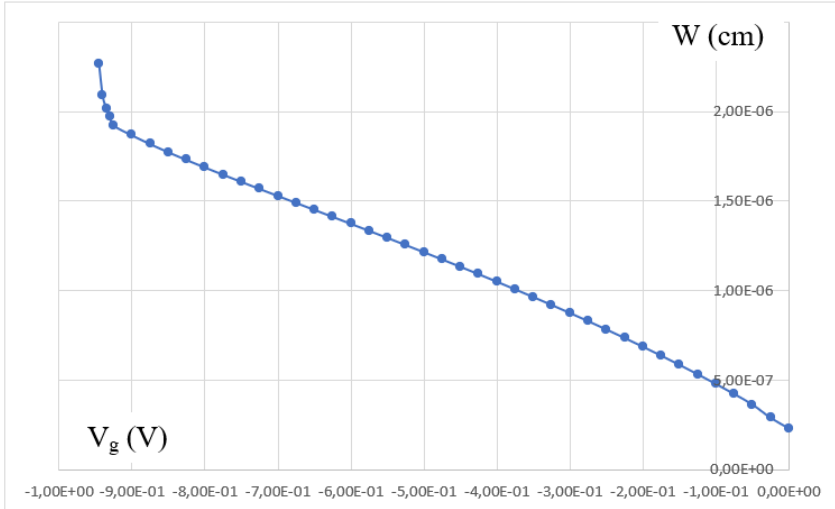


Рис. 3. Зависимость ширины области обеднения в затворе от напряжения на затворе.

Fig. 3. Dependence of the width of the depletion region in the gate on the gate voltage

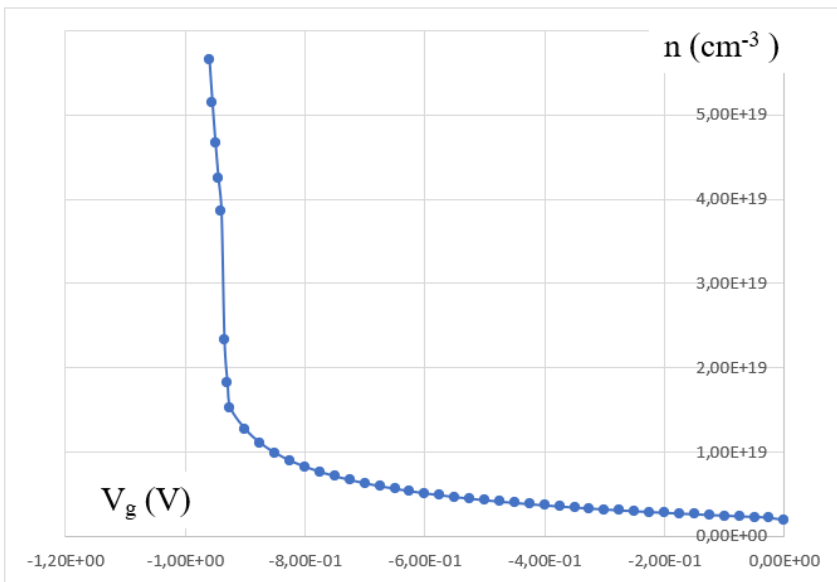


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов проводимости в центре затвора от напряжения на затворе.

Fig. 4. Dependence of the concentration of conduction electrons at the center of the gate on the gate voltage

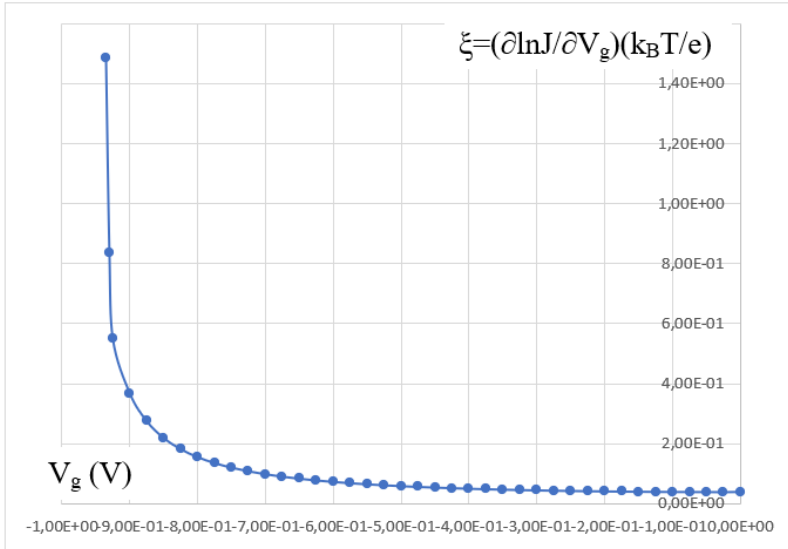


Рис. 5. Зависимость параметра  $\xi$  от напряжения на затворе на начальном участке возрастания.

Rice. Fig. 5. Dependence of the parameter  $\xi$  on the gate voltage in the initial section of the increase

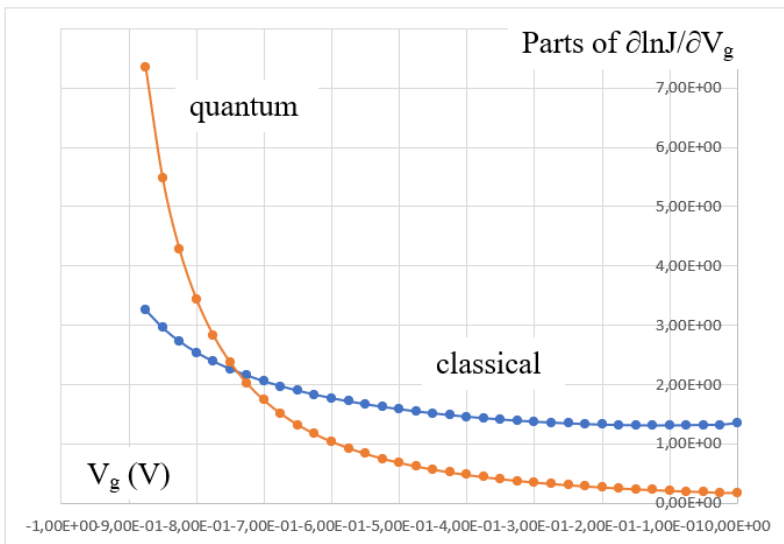
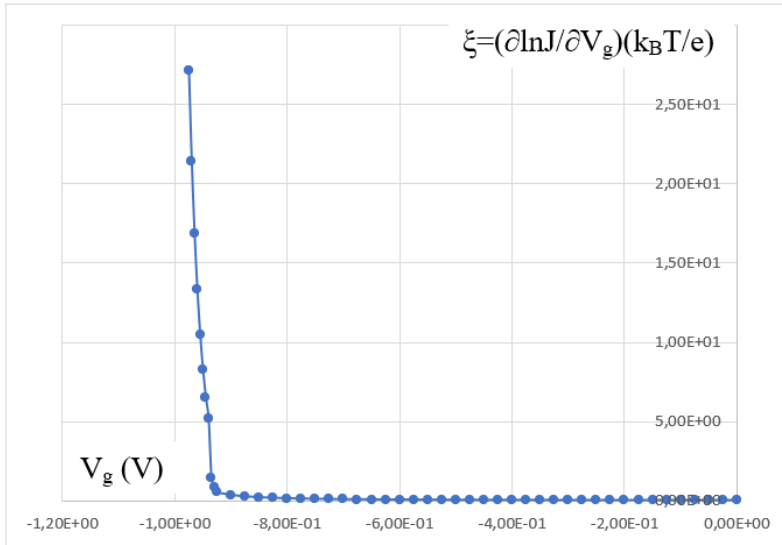


Рис. 6. Классический и квантовый вклады в подпороговую крутизну транзистора.

Fig. 6. Classical and quantum contributions to the subthreshold transconductance of a transistor.

Рис. 7. Зависимость параметра  $\xi$  от напряжения на затворе.Fig. 7. Dependence of the parameter  $\xi$  on the gate voltage

#### 4. Заключение

В настоящей работе предложена конструкция полевого транзистора с каналом из нанопровода и областью затвора из металла. Для создания необходимого потенциального рельефа для электронов в канале и в затворе транзистора необходимо, чтобы размеры элементов прибора были меньше, чем длина размерного квантования электронов при температуре функционирования.

При нулевых напряжениях на контактах затвора транзистор заперт. Плотность тока в нем определяется концентрацией собственных носителей заряда в нанопроводе (в канале), которая может быть сделана малой за счет уменьшения его поперечного сечения и соответствующего эффективного расширения запрещенной зоны. При приложении к контактам затвора отрицательного напряжения концентрация электронов в затворе в области канала увеличивается, а потенциальный барьер на границе затвор-канал понижается. В результате за счет инжектируемых из затвора электронов возрастает плотность тока в канале.

Подпороговая крутизна такого транзистора может существенно превышать термоэмиссионный предел. Этот результат является следствием размерного квантования энергии электронов в области затвора.



### Список литературы

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия. 2020. Т. 1, № S5-1 (102). С. 13—19.
2. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : «Вебер», 2005. 226 с.
3. Обухов И. А. Многокомпонентная модель переноса заряда в квантовых полупроводниковых приборах // Нано- и микросистемная техника. 2021. Том 23, № 1. С. 24—31.
4. Особенности проявления квантового размерного эффекта в явлениях переноса в тонких пленках висмута на подложках из слюды / Е. В. Демидов и др. // Физика и техника полупроводников. 2019. Том 53, вып. 6. С. 736—740.

### Информация об авторе

**Обухов Илья Андреевич**, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

# Field Effect Transistor with Metal Gate

I. A. Obukhov

*Scientific-Industrial Company "Radiotechnika"*  
15, build. 11, 5<sup>th</sup> Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation  
iao001@mail.ru, ia@nprrt.ru

Received: May 27, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

**Abstract:** *The design and the principle of operation of a field effect transistor based on a semiconductor nanowire with a metal gate is presented and described. The subthreshold slope of the device has been estimated and was shown that it may to exceed the thermionic limit (value  $e/k_B T$ ).*

**Keywords:** *field effect transistor, nanowire, dimensional quantization, metal gate.*

**For citation (IEEE):** I. A. Obukhov, "Field Effect Transistor with Metal Gate," *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 275–284, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21. (In Russ.).

## References

- [1] G. Ya. Krasnikov, "The Capabilities of Microelectronic Processes with 5 nm Critical Dimension and Less," *Nanoindustry*, vol. 1, no S5-1 (102), pp. 13–19, 2020 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5s.13.19>.
- [2] I. A. Obukhov, *Modeling of Charge Transfer in Mesoscopic Structures*, Moscow–Kyiv–Minsk–Sevastopol : Weber Publ. Co., 2005. (In Russ.).
- [3] I. A. Obukhov, "Multicomponent Model of Charge Transport in Quantum Semiconductor Devices," *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 23, no. 1, pp. 24–31, 2021, doi: 10.17587/nmst.23.24-31.
- [4] E. V. Demidov et al., "The Quantum Size Effect Specific Features of in the Transport Phenomena in Thin Bismuth Films on Mica Substrates," *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, vol. 53, no 6. pp. 736–740, 2019. (In Russ.). DOI: 10.21883/FTP.2019.06.47718.27.

## Information about the author

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.