

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

А.М. Парагульгов

paragulgovam@student.bmstu.ru

Е.В. Глинская

glinskaya@bmstu.ru

SPIN-код: 5430-3023

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Статья посвящена полевым транзисторам — ключевым элементам современной полупроводниковой электроники, ток в которых регулируется посредством электрического поля. Рассмотрены основные принципы функционирования транзисторов с $p-n$ -переходом, их конструктивные особенности, вольт-амперные характеристики и варианты схем включения. Особое внимание уделено достоинствам этих устройств, включая высокое входное сопротивление и превосходные частотные показатели. Приведены примеры их применения в инженерной практике, такие как аналоговые схемы, усилители с фотодиодами и схемы с изменяемым коэффициентом усиления. В работе подчеркнута важность полевых транзисторов в современной электронике и отмечены их преимущества над биполярными транзисторами.

Ключевые слова: полевые транзисторы, управляющий $p-n$ -переход, вольт-амперные характеристики, высокое входное сопротивление, аналоговые схемы, фотодиодный усилитель, частотные свойства, переменное сопротивление

Введение. Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые устройства, обычно имеющие три вывода, в которых управление выходным током осуществляется посредством электрического поля. Это определение не только подтверждает сделанные предположения, но и подчеркивает особенность полевых транзисторов: регулирование выходного тока происходит за счет изменения приложенного электрического поля, т. е. напряжения (для сравнения: в биполярных транзисторах управление осуществляется входным током базы).

Дополнительный интерес представляет и другое название полевых транзисторов — униполярные. Это указывает на то, что в процессе проведения тока участвуют носители заряда только одного типа (либо электроны, либо дырки). Контакты таких транзисторов именуется следующим образом: исток (где формируется носитель тока), затвор (управляющий электрод) и сток (электрод, через который ток выходит). Хотя их конструкция выглядит достаточно простой и напоминает схему биполярного транзистора, ее можно реализовать как минимум двумя способами. В результате выделяют полевые

транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом и с изолированным затвором. Отметим, что идея последних была предложена еще в 1920-х годах, задолго до появления биполярных транзисторов, однако технологический уровень позволил воплотить ее только в 1960 г. В 1950-х годах сначала была теоретически описана, а затем реализована версия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом. Как и их биполярные «собратья», полевые транзисторы до сих пор играют значительную роль в электронике.

Устройство и принцип работы полевого транзистора. Полевой транзистор состоит из трех ключевых компонентов: истока, стока и затвора. Исток и сток отвечают за генерацию и прием носителей электрического заряда (электронов или дырок), в то время как затвор контролирует ток, проходящий через транзистор. По своей конструкции он напоминает классический триод, где катод и анод заменены истоком и стоком, а затвор играет роль управляющего электрода.

При подаче напряжения на затвор формируется электрическое поле, которое влияет на ширину $p-n$ -перехода и, соответственно, на ток, протекающий между истоком и стоком. Когда управляющее напряжение отсутствует, движение носителей заряда не ограничено, что позволяет току свободно проходить через канал. Однако с увеличением напряжения на затворе канал начинает сужаться. Когда напряжение на затворе достигает критического уровня, канал полностью перекрывается и транзистор переходит в режим отсечки. Это свойство делает полевые транзисторы подходящими для использования в качестве ключевых элементов. Усилительные характеристики полевого транзистора связаны с тем, что ток, протекающий от истока к стоку, изменяется в соответствии с амплитудой напряжения, подаваемого на затвор. В результате выходной сигнал повторяет форму входного, но с увеличенной мощностью [1].

Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом. Принцип действия полевого транзистора можно рассмотреть на примере n -канального транзистора (см. рис. 1). При нулевом управляющем напряжении между затвором и истоком ($U_{зи} = 0$ В) канал остается в проводящем состоянии, электроны свободно перемещаются (отображены на рис. 1 в виде точек). С увеличением напряжения между стоком и истоком ($U_{си}$) возрастает ток стока (I_c) через канал, и транзистор функционирует в омической области.

Дальнейшее увеличение напряжения $U_{си}$ приводит к уменьшению количества свободных носителей заряда, что способствует формированию обедненного слоя. Данная область наиболее выражена вблизи стока, где присутствует питающее напряжение и достигается максимальная напряженность электрического поля. Формирование обедненного слоя вызывает сужение проводящего канала, что приводит к замедлению роста тока. В этом случае транзистор переходит

в область насыщения. На вольт-амперной характеристике (слева на рис. 1) четко обозначены омическая область и область насыщения.

Если приложить к затвору отрицательное напряжение $U_{зи}$, область $p-n$ -перехода расширяется в сторону канала. Это приводит к его дальнейшему сужению и уменьшению тока, протекающего через транзистор. Когда абсолютное значение напряжения на затворе достигает определенного уровня, канал полностью перекрывается, проводимость прекращается, и транзистор переходит в режим отсечки. Напряжение $U_{зи}$, при котором наступает этот режим, называется напряжением отсечки $U_{отс}$ [2].

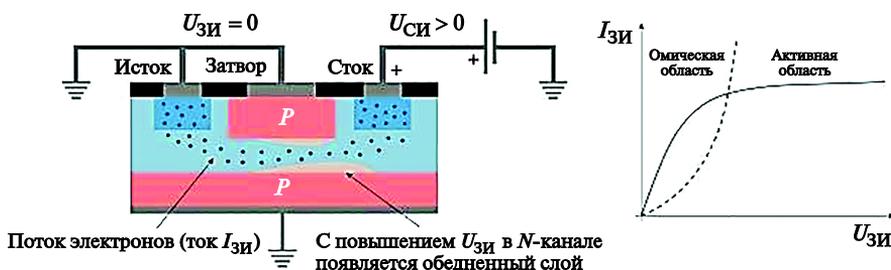


Рис. 1. Принцип работы полевого транзистора на примере n -канального транзистора

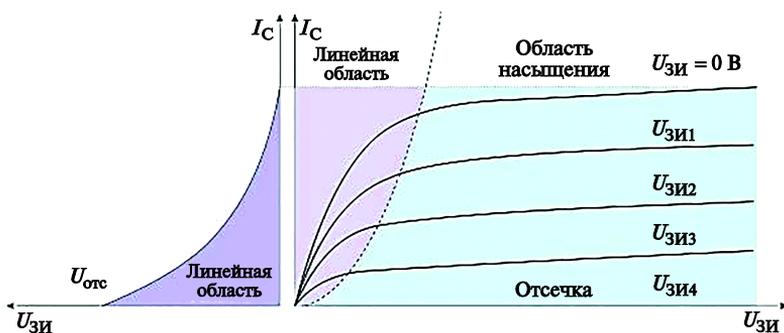


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с $p-n$ -переходом при различных управляющих напряжениях $U_{зи}$

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики полевого транзистора с $p-n$ -переходом при различных значениях управляющего напряжения $U_{зи}$, которые удовлетворяют следующему соотношению:

$$|U_{зи4}| > |U_{зи3}| > |U_{зи2}| > |U_{зи1}| > 0 \text{ В.}$$

Ток стока при нулевом управляющем напряжении «затвор — исток» $U_{ЗИ} = 0$ называется начальным током стока I_{C0} . В большинстве случаев вольт-амперная характеристика такого транзистора описывается выражением

$$I_C = I_{C0} \left[1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{отс}} \right]^2. \quad (1)$$

Крутизна полевого транзистора, характеризующая его усилительные свойства, определяется формулой, которая учитывает соотношение (1):

$$G_m = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = -2I_{C0} \frac{U_{отс} U_{ЗИ}}{U_{отс}^2}. \quad (2)$$

В справочных данных обычно значение крутизны полевого транзистора указывают при $U_{ЗИ} = 0$. В этом случае выражение (2) принимает следующий вид:

$$G_m = -2 \frac{I_{C0}}{U_{отс}}.$$

Полевые транзисторы с p - n -переходом имеют следующие преимущества [3]:

1) высокое входное сопротивление. Ток через обратно смещенный p - n -переход крайне мал и обычно не превышает нескольких микроампер. Однако важно учитывать, что при повышении температуры на каждые 10°C ток затвора удваивается;

2) отличные частотные свойства. Благодаря отсутствию неосновных носителей в структуре транзистора, исключается процесс их рассасывания, который ухудшает частотные характеристики биполярных транзисторов;

3) униполярность. В работе участвуют только основные носители заряда, что упрощает устройство и улучшает его характеристики.

Существуют три основные схемы включения полевых транзисторов (рис. 3).

Схема с общим истоком (рис. 3, а) находит широкое применение благодаря возможности усиления мощности сигнала. Схема с общим затвором (рис. 3, б) характеризуется низким входным сопротивлением и отсутствием усиления сигнала, в связи с чем используется реже. Схема с общим стоком, также известная как истоковый повторитель (рис. 3, в), обладает высоким входным сопротивлением, однако коэффициент усиления напряжения близок к единице [4].

Статические характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом. В полевых транзисторах, ток затвора очень мал в рабочем режиме, что позволяет игнорировать его влияние на характеристики устройства. Основное внимание уделяется выходным характеристикам, которые

описывают зависимость тока стока от напряжения стока при фиксированном напряжении на затворе [5].

Статические характеристики позволяют инженерам и разработчикам лучше понять поведение транзистора в различных режимах работы, а также оптимизировать схемы для достижения нужных параметров. Исключение динамических эффектов упрощает анализ и проектирование, что особенно важно при работе с высокочастотными сигналами или в условиях, когда требуется высокая стабильность работы устройства.

Выходная (стоковая) характеристика представляет собой зависимость тока стока от напряжения «исток — сток» при фиксированном напряжении «затвор — исток». На рисунке представлен соответствующий график, на котором выделяются три основные области:

1) омическая область. В данной области наблюдается резкое увеличение тока стока. Канал «исток — сток» ведет себя как резистор, сопротивление которого управляется напряжением на затворе транзистора;

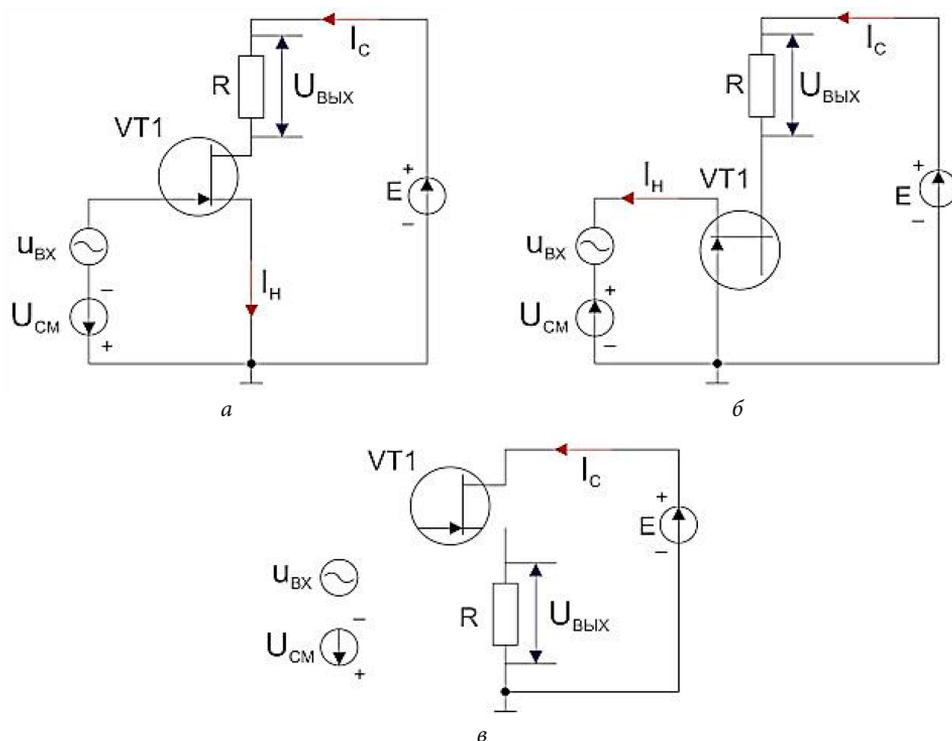


Рис. 3. Схемы включения полевых транзисторов с *p-n*-переходом:
а — с общим истоком; *б* — с общим затвором; *в* — с общим стоком

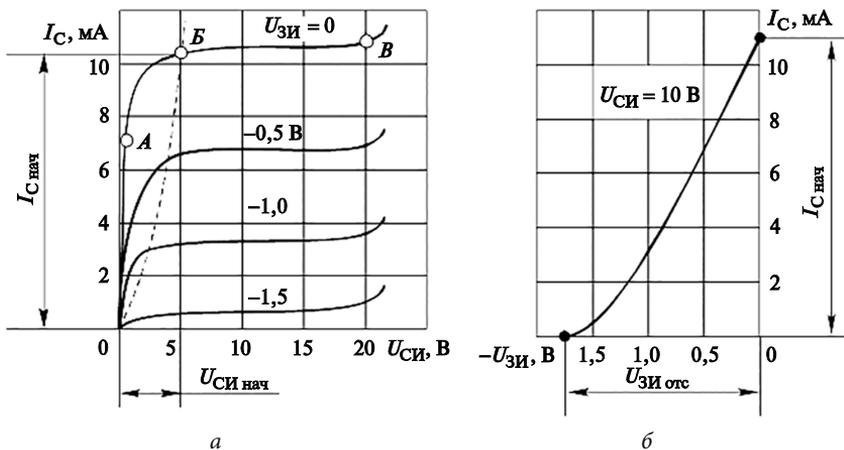


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики транзистора: зависимости коллекторного (а) и эмиттерного (б) токов от напряжений

2) область насыщения. Характеризуется почти линейным видом. Здесь происходит частичное перекрытие канала в области стока, которое усиливается с ростом напряжения исток-сток. В результате сопротивление канала увеличивается, а ток стока изменяется незначительно (в соответствии с законом Ома). Данная область наиболее часто используется в усилительной технике, поскольку в ней достигаются минимальные нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения параметров транзистора, важных для усиления, таких как:

- крутизна характеристики;
- внутреннее сопротивление;
- коэффициенту усиления.

Данные параметры будут рассмотрены более подробно далее;

3) область пробоя. В этой зоне происходит пробой транзистора, что сопровождается резким увеличением тока. Название области говорит само за себя.

На правой части рис. 4 представлен график еще одной важной зависимости — стоко-затворной характеристики. Она описывает, как ток стока зависит от напряжения «затвор — исток» при фиксированном напряжении «исток — сток». Крутизна этой характеристики является одним из ключевых параметров полевого транзистора [6].

Принцип работы полевого МОП-транзистора. МОП-транзистор (MOSFET, «металл — оксид — полупроводник») представляет собой полевой транзистор с изолированным затвором, где канал отделен от затвора тонким

диэлектрическим слоем (рис. 5). Его также называют униполярным транзистором. Основные области применения МОП-транзисторов включают выполнение функций электронного переключателя и усилителя электронных сигналов как в традиционных, так и современных системах.

Практически все транзисторы MOSFET имеют три вывода: исток, сток и затвор. Существуют также специальные транзисторы с несколькими затворами, которые применяются в цифровой технике для создания логических элементов или ячеек памяти EEPROM.

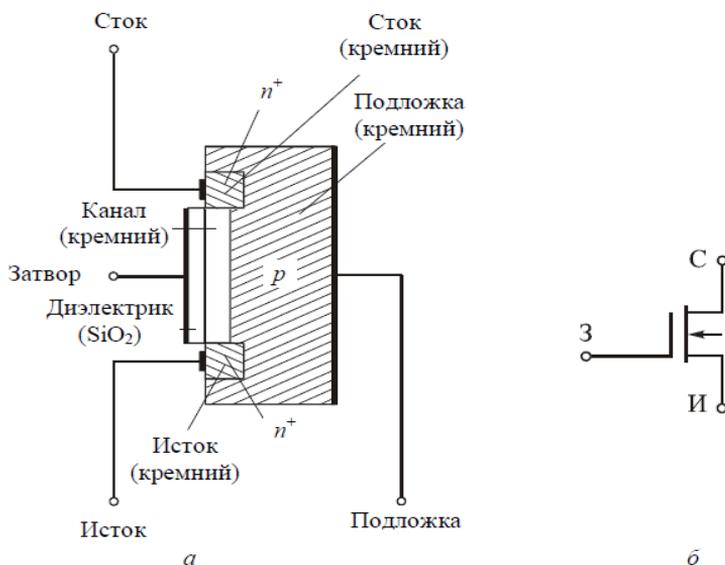


Рис. 5. Структура и условное обозначение МОП-транзистора (*n*-канал):

a — физическое устройство; *б* — электрическая схема

Основные характеристики МОП-транзисторов включают:

- 1) управляющее напряжение — это напряжение, подаваемое на затвор, которое определяет режим работы транзистора;
- 2) внутреннее сопротивление и допустимый ток в открытом состоянии — эти параметры определяют эффективность проводимости тока транзистором при его включении;
- 3) максимально допустимое напряжение в закрытом состоянии — это напряжение, которое транзистор может выдерживать между истоком и стоком, когда он находится в выключенном состоянии [7].

Применение полевых транзисторов с *p-n*-переходом (JFET). В инженерной практике полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом часто

применяются в аналоговых схемах, например, совместно с операционными усилителями или в силовых устройствах в качестве ключей. Рассмотрим пример их использования в фотодиодном усилителе, где полевой транзистор с $p-n$ -переходом играет роль повторителя. Основная задача транзистора — изолировать фотодиод от операционного усилителя, что позволяет избежать влияния емкости фотодиода (около 3000 пФ) на инвертирующий вход усилителя. Это, в свою очередь, значительно увеличивает полосу пропускания всей схемы [2].

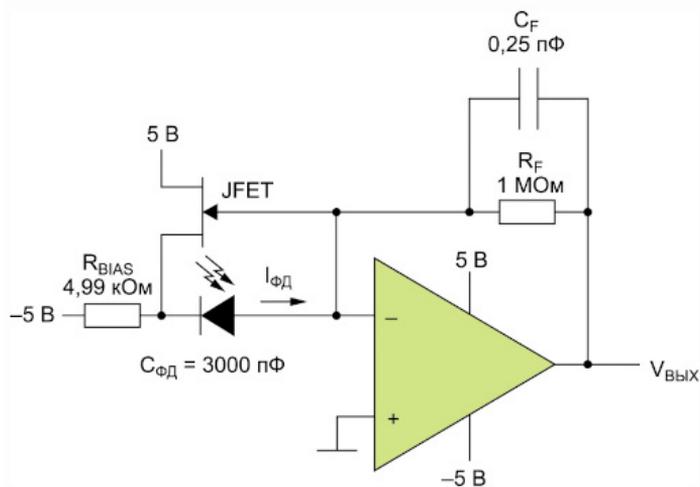


Рис. 6. Схема фотодиодного усилителя

Коэффициент передачи шума $K_{ш}$ в данной схеме определяется формулой

$$K_{ш} = 1 + C_{вх} / C_{вых}.$$

Использование полевого транзистора снижает входную емкость, что уменьшает уровень шума. Кроме того, транзистор увеличивает входное сопротивление схемы, что приводит к снижению коэффициента усиления входного смещения $K_{у.см}$, который рассчитывается по формуле

$$K_{у.см} = 1 + R_{ОС} / R_{вх}.$$

Недостаток схемы (рис. 6) заключается в том, что к фотодиоду прикладывается отрицательное напряжение, из-за чего возрастает его темновой ток, который к тому же зависит от температуры. Если пользователей интересует только переменная составляющая сигнала фотодиода, указанным недостатком можно пренебречь. Если же важна и постоянная составляющая сигнала, следу-

ет воспользоваться улучшенной схемой фотодиодного усилителя (рис. 7). В этой схеме используются два согласованных полевых транзистора в одном корпусе. Нижний транзистор является источником тока, значение тока задается сопротивлением $R2$ в цепи истока и выбирается таким образом, чтобы потенциал катода фотодиода был близок к нулю. Для более точной подстройки нулевого смещения можно добавить потенциометры $R4$ и $R6$.

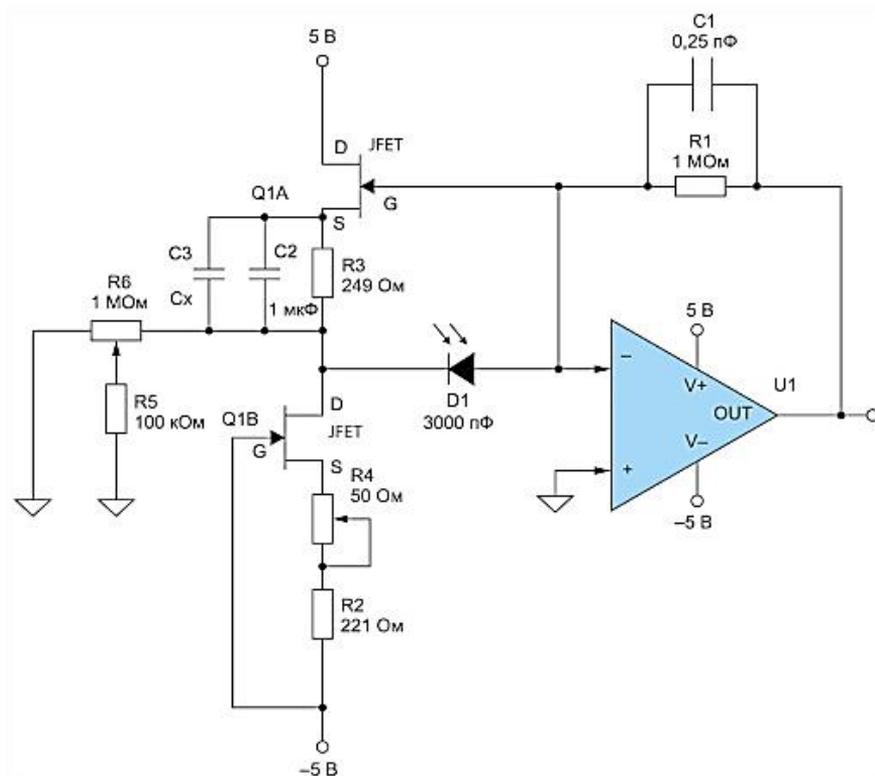


Рис. 7. Улучшенная схема фотодиодного усилителя

Полевые транзисторы, особенно *n*-канальные, находят широкое применение в схемах управления усилением и аттенюации. Использование напряжения с потенциометра для управления затвором позволяет точно регулировать сопротивление транзистора и, соответственно, уровень выходного сигнала. Кроме того, применение пульсирующего напряжения вместо постоянного позволяет реализовать модуляцию, что может быть полезно в различных радиочастотных приложениях и системах передачи данных. Это позво-

ляет создавать более гибкие и экономичные решения для управления сигналами без необходимости использования сложных аналоговых схем [2].

Заключение. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом занимают важное место в современной электронике благодаря своим уникальным характеристикам, таким как высокое входное сопротивление, низкий уровень шума и отличные частотные характеристики. Они используются в самых различных задачах, включая усиление сигналов, управление мощностью и применение в аналоговых схемах. Несмотря на простоту своей конструкции, полевые транзисторы обеспечивают высокую функциональность и надежность, что делает их незаменимыми в различных инженерных решениях. В этой работе подчеркивается, что полевые транзисторы остаются актуальными и востребованными компонентами в электронике, обеспечивая высокую эффективность и производительность.

Литература

- [1] Голомедов А.В., ред. *Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы*. Москва, Радио и связь, 1985, 560 с.
- [2] *Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды+SMD. 0-9. Справочник*. Москва, Наука и техника, 2008, 816 с.
- [3] Куликов С.В., Чистяков Б.В. *Дискретные преобразователи сигналов на транзисторах*. Москва, Энергия, 2015, 288 с.
- [4] *Полевой транзистор с управляющим p - n переходом: принцип работы и применение*. URL: https://www.promelec.ru/articles/polevoy-tranzistor-s-upravlyayuschim-p-n-perehodom_printsip-raboty-i-primeneniye/?ysclid=m7qj37k3o621281896 (дата обращения 17.02.2025).
- [5] *Мощные биполярные транзисторы для импульсных источников питания, tv-приемников и мониторов*. Москва, МК-Пресс, Додэка XXI, 2011, 544 с.
- [6] *Принципы работы полевых транзисторов: теория и практика*. URL: <https://habr.com/ru/articles/133493/> (дата обращения 17.02.2025).
- [7] *Принцип работы полевого МОП-транзистора: устройство и применение*. URL: <https://www.radioelementy.ru/articles/printsip-raboty-polevogo-mop-tranzistora/?ysclid=m7ri7pet3r792885585> (дата обращения 17.02.2025).

Поступила в редакцию 17.03.2025

Парагульгов Амир Муслимович — студент кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Глинская Елена Вячеславовна — старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Басараб Михаил Алексеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Парагульгов А.М., Глинская Е.В. Полевые транзисторы. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1061.html>

FIELD-EFFECT TRANSISTORS

A.M. Paragulgov

E.V. Glinskaya

paragulgovam@student.bmstu.ru

glinskaya@bmstu.ru

SPIN code: 5430-3023

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

This paper examines field-effect transistors as active semiconductor devices, where the output current is controlled by an electric field. The fundamental principles of operation of field-effect transistors with a control p-n junction, their structural features, current-voltage characteristics, and circuit configurations are described. Special attention is given to the advantages of such transistors, including high input resistance and excellent frequency properties. Examples of their application in engineering practice are also provided, including their use in analog circuits, photodiode amplifiers, and circuits with a variable gain factor. The work emphasizes the significance of field-effect transistors in modern electronics and their advantages over bipolar transistors.

Keywords: field-effect transistors, control p-n junction, current-voltage characteristics, high input resistance, analog circuits, photodiode amplifier, frequency properties, variable resistance

Received 17.03.2025

Paragulgov A.M. — Student of Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Glinskaya E.V. — Senior Lecturer of Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Basarab M.A., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Head of Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Paragulgov A.M., Glinskaya E.V. Field-effect transistors. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1061.html>