

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49>

УДК 53(075.3)

Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов

Часть 2

**Формирование электрического тока смещения и вольт-амперной характеристики
в биполярном транзисторе**

Л. И. Гречихин¹⁾

¹⁾УО «Белорусская государственная академия связи» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Ионизация отрицательных ионов в столбообразных пустотах определяется температурой, а также внешней приложенной напряженностью электрического поля. Вследствие ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости полупроводниковой основы образуются свободные электроны без их движения с образованием тока проводимости. Такие свободные электроны в совокупности создают внутреннее электрическое поле, которое изменяется из-за процессов ионизации и рекомбинации. Изменяющееся электрическое поле совершает колебания в инфракрасной области спектра, что является причиной возникновения электрического тока смещения. Величина тока смещения обусловлена приложенным напряжением между эмиттером и коллектором, но достаточно сложным образом. Оптимальное приложенное напряжение составляет ~6 В. При этом напряжении рассчитанный электрический ток в эмиттере достигает миллиампер, а в базе – микроампер, что соответствует экспериментальным данным. Непрерывное колебание электрического поля вследствие ионизации и рекомбинации отрицательных ионов в столбообразной пустоте приводит к разогреву транзистора инфракрасным излучением. Оптимальные условия работы транзистора реализуются, когда на базу подается дополнительное напряжение 2,5–3,0 В. Для уменьшения температуры разогрева транзистора создают массивный коллектор, который заземляется.

Ключевые слова: транзистор, ток проводимости, ток смещения, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 2: Формирование электрического тока смещения и вольт-амперной характеристики в биполярном транзисторе / Л. И. Гречихин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 34–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49>

Адрес для переписки

Гречихин Леонид Иванович
УО «Белорусская государственная
академия связи»
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Address for correspondence

Gretchikhin Leonid I.
Educational Institution “Belarusian State
Academy of Communication”
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions

Part 2

Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution "Belarusian State Academy of Communication"
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The ionization of negative ions in columnar voids is determined by temperature, as well as by the externally applied electric field strength. Due to the ionization of negative ions in the conduction band of the semiconductor base, free electrons are formed without their movement, forming a conduction current. These free electrons together create an internal electric field, which changes due to the processes of ionization and recombination. The changing electric field oscillates in the infrared region of the spectrum, which causes the displacement current to arise. The magnitude of the bias current is determined by the applied voltage between the emitter and collector, but in a rather complex way. The optimal applied voltage is ~6 V. At this voltage, the calculated electric current in the emitter reaches milliamperes, and in the base – microamperes, which corresponds to experimental data. Continuous oscillation of the electric field due to ionization and recombination of negative ions in the columnar void leads to heating of the transistor by infrared radiation. Optimal operating conditions for the transistor are achieved when an additional voltage of 2.5–3.0 V is applied to the base. To reduce the heating temperature of the transistor, a massive collector is created, which is grounded.

Keywords: transistor, conduction current, displacement current, volt-ampere characteristic

For citation: Gretchikhin L. I. (2026) Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 2: Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 34–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49> (in Russian)

Введение

Электрический ток формируют свободные электрические заряды в виде электронов, заряженных отрицательным зарядом. Полагали, что в этом случае электропроводность определяется n -проводимостью, а при наличии в основном положительно заряженных «дырок» электропроводность является p -проводимостью и возникает вследствие ионизации атомов¹. Первое серьезное обоснование работы разных электронных компонент было осуществлено в рамках физики твердого тела [1]. Под действием приложенного электрического поля электроны и положительно заряженные «дырки» создают электрический ток диффузии и дрейфа [2–4].

Электрический ток, возникающий вследствие диффузии и дрейфа, противоречит определению, которое было дано Максвеллом на основании записанных им уравнений, описывающих взаимодействие электрических и магнитных полей. Из уравнений Максвелла следует, что в природе существуют только два типа электрических токов – ток проводимости и ток смещения [5, 6]. Если вводить новые виды электрических токов,

¹ Чтобы ионизовать атом с энергией ионизации 10 эВ и радиусом 1 Å, необходимо приложить внешнее электрическое поле $E = 10^{11}$ В/м. Создать такое внешнее поле просто невозможно. Тогда о каких положительно заряженных «дырках» идет речь?

то надо разрабатывать под эти токи и новую электродинамику с доказательством, что теория Максвелла противоречит полученным экспериментальным данным. Однако справедливость теории Максвелла экспериментально доказана во всех случаях, в том числе и для полупроводников с примесями и без примесей [7].

На основании уравнений, представленных Максвеллом, электрический ток проводимости определяется движением свободных электрических зарядов преимущественно свободных электронов. Тогда

$$I_p = en_e v_e S, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация свободных электронов; v_e – подвижность электронов; S – площадь сечения, через которую движутся свободные электроны; в электронике она составляет не более 100×100 мкм² [2, 3].

Электрический ток смещения является потоком вектора скорости изменения электрического поля через некоторую поверхность, т. е. [5]

$$J_D = \int_0^S \frac{\partial D}{\partial t} dS, \quad (2)$$

где D – вектор электрического смещения, который создается свободными электрическими зарядами.

Перенос энергии токами смещения определяется вектором Умова – Пойнтинга, и только в этом случае выполняется закон Ома [5]. Для токов проводимости закон Ома не выполняется. По электрическим проводам и оптоволокну протекает только ток смещения и распространяется по поверхности для проводников и по центральному диэлектрику для оптоволокну. Поверхностный слой каждого твердого тела является диэлектриком, по которому распространяются токи смещения в виде электромагнитных волн. Такое определение току смещения было дано Николой Тесла независимо от Максвелла.

Для транзисторов разработаны два типа конструкций – биполярные и полевые. По ранее сформированным представлениям в обоих типах транзисторов используются два p – n перехода. Формируются оба перехода путем легирования основного полупроводника разными примесями. У катода и анода вводят один тип примеси, а между ними другой тип, т. е. возникают два варианта проводимостей: n – p – n или p – n – p .

В биполярном транзисторе внешние проводники обозначаются коллектор – эмиттер, а внутренняя область – база. В полевом транзисторе это исток – сток, а внутренняя – затвор. В электрических схемах оба типа транзисторов подключаются к источнику тока в трех вариантах: 1 – с общим коллектором (исток); 2 – с общей базой (затвором); 3 – с общим эмиттером (сток).

Наиболее часто применяется третий вариант включения, показанный на рис. 1. Для такого варианта включения биполярного транзистора экспериментально получена вольт-амперная характеристика, которая приведена на рис. 2 без указания того, какие примеси и каким методом вводились в кремниевую основу.

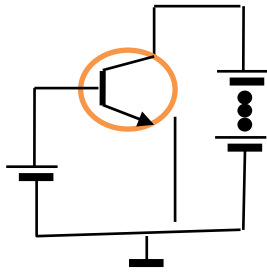


Рис. 1. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Fig. 1. Common emitter transistor circuit diagram

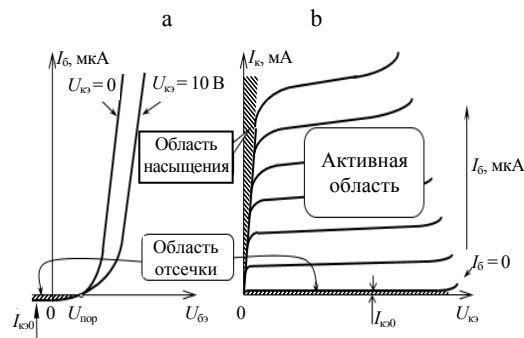


Рис. 2. Семейства входных (а) и выходных (б) характеристик биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Fig. 2. Families of input (a) and output (b) characteristics of a bipolar transistor in a common-emitter circuit

Полученная вольт-амперная характеристика кремниевого транзистора по виду соответствует вольт-амперной характеристике кремниевого диода при его обратном включении [7]. Отличие только в тангенсе угла наклона и в значениях приложенного напряжения между эмиттером и коллектором. Угол наклона определяется соотношением, какой механизм ионизации является определяющим вследствие воздействия температуры или воздействия внешнего приложенного электрического поля.

В настоящее время в биполярном транзисторе базу изолировали и получили вместо базы затвор, как у полевого транзистора. Следовательно, оба типа транзисторов работают на одном и том же физическом принципе. Их отличие состоит в разной конструкции исполнения. Обусловлено это тем, что возникновение электрических токов происходит не вследствие ионизации атомов, а вследствие ионизации отрицательных ионов [8–10], которые образуются в твердом теле на поверхности кристалла. Учитывая ионизацию отрицательных ионов, а также процесс формирования тока проводимости и тока смещения, по Максвеллу, рассмотрим подробно динамику работы транзистора с общим эмиттером (стоком). Для обоснования общей теории работы транзистора другие типы включения можно не рассматривать.

Чтобы выяснить динамику работы транзистора при наличии отрицательных ионов и их ионизации, необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть процесс ионизации отрицательных ионов под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля;
- выяснить, где и в каких условиях возникает ток проводимости и ток смещения;
- произвести расчет вольт-амперных характеристик биполярного транзистора с общим эмиттером в сравнении с экспериментальными данными.

Основная часть

Ионизация отрицательных ионов в столбообразных пустотах.

Каждый электронный прибор обладает своей характерной вольт-амперной характеристикой. Применительно к диодам и транзисторам вольт-ампер-

ную характеристику представляли на p – n переходе с использованием экспоненциальной зависимости от приложенного напряжения [2–4], что противоречит экспериментальным данным.

Для перевода связанного электрона в отрицательном ионе на поверхности кристалла полупроводниковой основы в свободный необходимо преодолеть энергию связи отрицательного иона с поверхностью кристалла в столбообразной пустоте

$$\Delta E = \Delta E_i - E_A, \quad (3)$$

где ΔE_i – смещение границы ионизации атомов полупроводниковой основы, которая определяет границу начала зоны проводимости полупроводникового кристалла; E_A – энергия сродства атомов примеси, которые находятся в зоне проводимости.

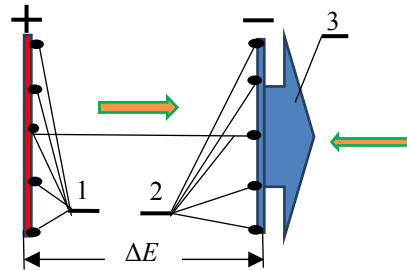


Рис. 3. Формирование электрического поля на поверхности кристалла полупроводниковой основы примесями: 1 – связанные отрицательные ионы; 2 – свободные отрицательные ионы; 3 – ток смещения

Fig. 3. Formation of an electric field on the surface of a semiconductor crystal by impurities: 1 – bound negative ions; 2 – free negative ions; 3 – displacement current

Переход (3) для отрицательного иона не запрещен, и он в зоне проводимости вследствие ионизации переходит из связанного состояния в свободное состояние. Образующийся положительный заряд в начале зоны проводимости своим полем компенсирует поле², создаваемое отрицательными ионами примеси, что показано на рис. 3.

Возникновение свободных электронов при ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости обусловлено воздействием температуры и внешнего электрического поля. Свободные электроны находятся выше границы ионизации атомов кристалла полупроводниковой основы. Аналогичное воздействие определено в [7, 11] для атомов примеси в диодах, когда включает-

ся обратное внешнее электрическое поле. Применительно к транзисторам вероятность перехода электронов отрицательных ионов примеси на границе полупроводникового кристалла из связанного состояния в свободное под действием внешнего электрического поля при заданной температуре определяется по формуле [11]³

$$\vartheta_1 = \left(1 - \frac{(e\Delta\phi)^2}{\Delta E^2} \right) \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_b T_e} \left(1 - \frac{(e\Delta\phi)^2}{\Delta E^2} \right) \right]. \quad (4)$$

² Это очень важное явление, с которым столкнулись впервые. К чему это новое явление может привести, кроме работы транзисторов, сейчас трудно предвидеть.

³ В данном случае речь идет о чисто автоэлектронной эмиссии, без учета изменения температуры.

На пространстве примесных атомов в виде отрицательных ионов наложенное внешнее электрическое поле наводит разность потенциалов величиной

$$\Delta\varphi = E_z 2r_a. \quad (5)$$

Напряженность электрического поля E_z в равенстве (5) создается величиной напряжения, приложенного между эмиттером и базой. Относительная диэлектрическая проницаемость контакта молекул алюминий – кремний и алюминий – германий при взаимодействии трехатомных молекул вокруг столбообразной пустоты равна [12]

$$\varepsilon_r = \frac{3^2 n_p P_{Si} P_{Al}}{3\varepsilon_0 k_b T}. \quad (6)$$

Здесь рассматривается взаимодействие двух разных трехатомных молекул полупроводниковой основы и алюминия; концентрация дипольных электрических моментов n_p трехатомных молекул кремния (или германия) и алюминия вокруг столбообразных пустот; P_{Si} и P_{Al} – электрические диполи атомов кремния и алюминия (или германия и алюминия); ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума по Зоммерфельду; k_b – постоянная Больцмана; T – температура транзистора.

Значение диэлектрической проницаемости для контакта алюминий – кремний и алюминий – германий составит $\varepsilon_r = 12,44$ и $\varepsilon_r = 8,29$ соответственно. Небольшое отличие диэлектрических проницаемостей от значений, полученных для диодов [7], обусловлено разным размещением электрических диполей в первом и во втором случаях.

Для транзисторов падение напряжения на атомах примеси внутри столбообразной пустоты составит

$$\Delta\varphi = U \frac{r_a}{\varepsilon_r (r_{Al} + r_{Si(Ge)})}. \quad (7)$$

Если разность потенциалов (7) умножить на заряд электрона, то получим энергию, которую отрицательный ион примеси приобретает от внешнего приложенного электрического поля. Если эта энергия будет равна или больше энергии сродства отрицательного иона примеси, то произойдет ионизация отрицательного иона и электрон перейдет из связанного состояния в свободное, т. е. выполняется условие

$$e\Delta\varphi \geq E_A. \quad (8)$$

Условие (8) германий – мышьяк и кремний – мышьяк должно выполняться соответственно при прямом приложенном напряжении 3,50 и 3,36 В, а для контактов германий – индий и кремний – индий приложенное напря-

жение составит 0,630 и 0,637 В. При подаче таких напряжений внешнее электрическое поле со временем не изменяется и электрический ток во внешней электрической цепи будет обладать постоянным значением. В транзисторе таких контактов два. Поэтому максимальное напряжение, подаваемое на транзистор, составляет: ~8,26 В – с германиевой основой, ~7,99 В – с кремниевой основой.

Кроме этого, необходимо обеспечить еще очень важное для транзисторов условие. Электрические токи, формируемые отрицательными ионами мышьяка и индия, существенно отличаются. Чтобы это устранить, необходимо обеспечить достаточную разность во времени в процессе легирования мышьяком и индием. Время легирования мышьяком должно быть значительно меньше времени легирования индием. Эти времена экспериментально определены, но оптимальное соотношение остается неясным⁴.

Образование отрицательных ионов в зоне проводимости полупроводниковой основы приводит к возникновению переменного электрического поля внутри столбообразной пустоты, а при наличии такого поля возникает электрический ток смещения вдоль поверхности полупроводниковой основы. Следовательно, в транзисторах возникает только электрический ток смещения⁵ и распространяется этот ток между поверхностями кристаллов алюминия и полупроводниковой основы. Поэтому транзисторы изготавливают так, чтобы контакты алюминия на эмиттере, базе и коллекторе (источка, затвора и стока) располагались на одной поверхности над полупроводниковой основой с примесями.

Возникновение электрического тока смещения в биполярном транзисторе. Общая конструктивная особенность транзисторов при диффузионном легировании примесей показана на рис. 4. Мономолекулярный слой, легированный мышьяком, присутствует во всех столбообразных пустотах под коллектором, базой и эмиттером, а дополнительно индий – только под коллектором и эмиттером. Когда наносится изготовленная пластина полупроводника на поверхность алюминиевых электродов, молекулярные поверхности сцепляются своими молекулами так, что образуется общая столбообразная пустота.

Молекулы в столбообразных пустотах на кристалле полупроводника распадаются на атомы, которые, взаимодействуя с кристаллом полупроводника, превращаются в отрицательные ионы. Энергетически примеси отрицательных ионов мышьяка и индия находятся на границе смещения энергии ионизации атомов полупроводниковой основы, за которой образуется зона проводимости кристалла полупроводника. На основании энергетической схемы расположения примесей в столбообразной пустоте [13, рис. 9] смещение границы ионизации атомов кремния и германия

⁴ В результате технология производства чипов для микросхем реализуется на уровне интуиции.

⁵ Ранее полагали, что свободные электроны в зоне проводимости создают ток проводимости вследствие диффузии. Такой электрический ток в принципе невозможен, так как электроны внутри кристалла двигаться не в состоянии.

составляет ширину зоны проводимости соответственно для мышьяка и германия 1,158 и 0,829 эВ.

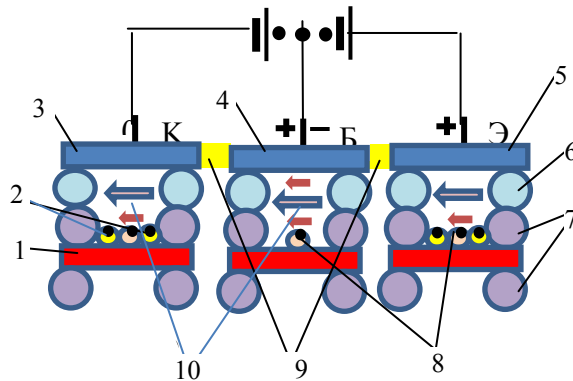


Рис. 4. Общий вид столбообразных пустот на разных электродах полупроводникового транзистора: 1 – кристалл полупроводника; 2 – атомы индия; 3 – кристалл коллектора; 4 – кристалл базы; 5 – кристалл эмиттера (алюминий); 6 – молекулы на кристалле электродов из алюминия; 7 – молекулы на поверхности кристалла полупроводниковой основы; 8 – атомы мышьяка в столбообразных пустотах полупроводниковой основы; 9 – прослойка из диэлектрика Al_2O_3 ; 10 – электрический ток смещения

Fig. 4. General view of columnar voids on different electrodes of a semiconductor transistor: 1 – semiconductor crystal; 2 – indium atoms; 3 – collector crystal; 4 – base crystal; 5 – emitter crystal (aluminum); 6 – molecules on a crystal of aluminum electrodes; 7 – molecules on the surface of a semiconductor crystal; 8 – arsenic atoms in columnar voids of the semiconductor base; 9 – прослойка из диэлектрика Al_2O_3 dielectric layer; 10 – electric displacement current

Чтобы получить свободные электроны в зоне проводимости при ионизации отрицательных ионов мышьяка на основании энергетической схемы расположения примесей $\Delta E = 1,158 - 0,80 = 0,358$ в столбообразной пустоте, необходимо преодолевать энергию 0,358 эВ, а при ионизации индия – энергию 0,858 эВ. Аналогично для германия эти величины составляют 0,029 и 0,529 эВ. Отсюда следует, что для кремниевого транзистора мышьяк в эмиттерной зоне создает электромагнитное излучение частотой $\nu_a = 8,656 \cdot 10^{13}$ Гц, а индий $\nu_i = 1,279 \cdot 10^{14}$ Гц. В германиевом транзисторе соответственно $\nu_a = 7,012 \cdot 10^{12}$ Гц и $\nu_i = 8,656 \cdot 10^{13}$ Гц. В обоих случаях это диапазон инфракрасного излучения. Наибольшая мощность излучения возникает в эмиттерной зоне. Возникший поток мощности инфракрасного излучения в соответствии с рис. 2 может распространяться только в направлении от эмиттера в базу между полупроводником и алюминиевыми электродами и преимущественно вдоль алюминиевых электродов по глиноземному покрытию. Глинозем используется в качестве диэлектрика между электродами и поэтому не является препятствием для распространения электромагнитного излучения в зонах контакта эмиттер – база и база – коллектор. Когда на базу подается напряжение, работает не полный размер базы, а только ее часть. Насыщенная часть в контакте эмиттер – база и обедненная часть в контакте база – коллектор исключаются из работы базы. В этом заключается эффект Эрли.

Полное возбуждение примесей мышьяка на основе кремния произойдет при температуре ~ 4152 К, а на основе германия ~ 336 К. Следовательно, транзисторы на германиевой основе должны работать при температурах не выше 63°C . В результате при длительной работе происходит разогрев электрической схемы и германиевый транзистор на изменение температуры не реагирует. Эффективность работы германиевого транзистора несколько ухудшается. Поэтому германиевый транзистор применяется в редких случаях и изготавливается в ограниченных количествах.

На основании экспериментальных данных полагают, что в зоне эмиттера концентрация акцепторных примесей достигает $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а в базе концентрация донорной примеси составляет $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В рассматриваемом варианте с учетом старой терминологии акцепторная примесь – это индий и донорная примесь – мышьяк. На площади $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ содержится $1,342 \cdot 10^9$ столбообразных пустот. Мышьяк заполняет только 10^5 пустот. Тогда доля пустот, которые заполнены индием, по сравнению с долей пустот, которые заполнены мышьяком, составит примерно $\gamma = 1,342 \cdot 10^4$. В отсутствие дополнительного сигнала на базе электрический ток в базе должен соответствовать электрическому току в эмиттере.

Следует учитывать не только то, как соотносятся площади заполненных столбообразных пустот с разными примесями, но и их мощности, которые зависят от времени жизни возбужденного состояния. Отношение этих времен жизни возбужденных состояний равно отношению их энергий возбуждения. Из энергетической схемы расположения примесей в столбообразной пустоте следует, что такое отношение времен жизни индия и мышьяка составляет для кремниевого транзистора $0,868/0,358$. Следовательно, для кремниевого транзистора получаем эффективное значение $\gamma \approx 3,254 \cdot 10^4$.

Убыль отрицательных ионов в зоне проводимости введенных примесей на поверхность германия или кремния непрерывно восполняется путем спонтанного перехода электронов отрицательных ионов в исходное состояние, т. е. на границу перехода между распределением их по энергиям в кристалле германия или кремния. Количество отрицательных ионов на уровне смещенной границы ионизации атомов полупроводниковой основы будет находиться в связанном состоянии постоянно.

Некоторая доля отрицательных ионов примеси под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля будет пребывать на уровне энергии сродства, который находится в зоне проводимости полупроводниковой основы. В этом случае ионизация отрицательных ионов происходит самопроизвольно, что приведет к образованию свободных электронов в зоне проводимости. Свободные электроны, накапливаясь на уровне энергии сродства, будут самопроизвольно возвращаться обратно. При этом возникают электромагнитные волны, которые распространяются вдоль поверхности кристалла полупроводниковой основы и алюминия, создавая ток смещения. Ранее полагали, что не отрицательные ионы, а свя-

занные электроны являются «тяжелыми», а свободные электроны являются «легкими» и они отличаются по массе⁶ [2].

Напряжение на транзистор подается только одного направления от эмиттера к коллектору. Для общей площади полупроводникового кристалла $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ упростим конструкцию транзистора и представим в виде, приведенном на рис. 5. Экспериментально добиваются, чтобы ширина базы составляла $l_2 \approx 25 \text{ мкм}$. Каждая электрически заряженная малая по ширине полоска создает неоднородное электрическое поле. Чтобы создать однородное поле, необходимо ширину полоски доводить до значения $\sim 25 \text{ мкм}$ и более⁷. Поэтому минимальный размер эмиттера следует принять $S_1 = 25 \times 25 \text{ мкм}^2$. Ширину изолирующих полос глинозема Al_2O_3 между алюминиевыми электродами достаточно реализовать $\sim 2 \text{ мкм}$. Тогда размер базы составит $S_2 \sim 2075 \text{ мкм}^2$, а размер коллектора $S_3 \sim 7300 \text{ мкм}^2$.

Напряжение подается от эмиттера к коллектору. На металле подаваемое напряжение создает эквипотенциальную поверхность. Поглощение электромагнитного излучения возникает только на глиноземных диэлектрических вставках. Общая длина глиноземных вставок в рассматриваемой конструкции (рис. 5) составляет 187 мкм , а обрамление эмиттера обладает длиной 79 мкм . Поэтому падение общего подаваемого напряжения между эмиттером и базой составит: $\Delta U_1 = \frac{79}{187} U \approx 0,42U$, а между базой и кол-

лектором $\Delta U_2 \approx 0,58U$. Учитывая условие (1), оптимальное напряжение между коллектором и эмиттером не должно превышать $\sim 6 \text{ В}$, т. е. на коллекторе напряжение равно нулю, а на базе при внешнем напряжении $\sim 6 \text{ В}$, это составит $3,48 \text{ В}$. Соответственно в зоне эмиттера падение напряжения составит $2,52 \text{ В}$, что менее предельного ($3,26 \text{ В}$). В результате условие (6) не нарушается.

Уровень энергии сродства отрицательного иона мышьяка и индия на поверхности германия или кремния находится в зоне проводимости этих кристаллов и обладает энергией связи, равной смещению потенциала ионизации атомов кристалла полупроводника. Для атомов кремния это

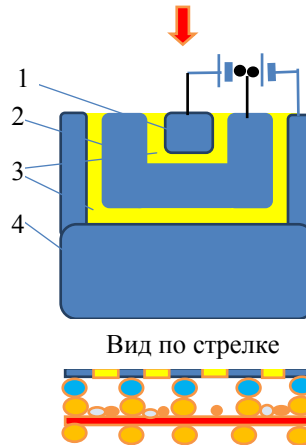


Рис. 5. Общий вид биполярного транзистора сверху: 1 – эмиттер; 2 – база; 3 – глиноземная прослойка; 4 – коллектор

Fig. 5. General view of a bipolar transistor from above: 1 – emitter; 2 – base; 3 – alumina layer; 4 – collector

⁶ Электрон является фундаментальной частицей, и поэтому разных электронов в природе не существует.

⁷ Удивительно, что теоретически заряженная полоска действительно создает однородное поле при ширине 25 мкм и более.

отрицательный уровень энергии 1,158 эВ, а для атомов германия 0,829 эВ. Такой энергией отрицательные ионы связаны с атомами кристалла полупроводника на его поверхности внутри столбообразной пустоты. Атомы примеси мышьяка и индия обладают энергией сродства соответственно 0,8 и 0,3 эВ [14]. Чтобы эти отрицательные ионы перевести в зону проводимости, необходимо затратить работу. Значения этих работ приведены на рис. 9 в [13].

Отрицательные ионы атомов примеси находятся на границе зоны проводимости кристалла кремния или германия, а их возбуждение с переводом в зону проводимости приводит к образованию свободных электронов. Свободные электроны возникают внутри зоны проводимости. Совершать движение внутри кристалла они не могут, но внутри столбообразной пустоты формируют внешнее электрическое поле. Такое поле изменяется во времени вследствие спонтанного перехода на основной уровень энергии зоны проводимости, превращаясь в связанные электроны. Опытами Эйхенвальда установлено, что вокруг изменяющегося во времени электрического поля возникает изменяющееся магнитное поле, т. е. формируется электромагнитная волна.

Электромагнитные волны в столбообразной пустоте переносят энергию вектором Умова – Пойнтинга в виде плоской волны. В этом случае среднее значение потока энергии электромагнитной волны в отдельной столбообразной пустоте равно [6]

$$P = \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\mu_r \mu_0}} \frac{(E_\tau^\tau)^2}{2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (11)$$

Здесь напряженность электрического поля E_τ^τ создается не внешним приложенным полем, а полем возбужденных свободных электронов вследствие самопроизвольной ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости, формирование которого показано на рис. 5.

Поверхностная концентрация отрицательных ионов в зоне проводимости формирует заряженную плоскость. Процессы возбуждения и спонтанного перехода создают непрерывное колебание наведенной напряженности электрического поля. В конечном итоге создается ток смещения. Величину амплитуды наведенной напряженности электрического поля внутри столбообразной пустоты представим в общем виде следующим образом:

$$E_\tau^\tau = \frac{eN_a \vartheta_1}{2\pi R_{\text{Si(Ge)}}^2 \epsilon_r \epsilon_0}. \quad (12)$$

Здесь eN_a – полное количество атомов примеси в столбообразной пустоте в виде отрицательных ионов; для мышьяка $N_a = 3$, а для индия $N_a = 2$; ϑ_1 – вероятность возбуждения отрицательных ионов атомов примеси на границе зоны проводимости, которая определяется формулой (2), преодо-

левая энергию связи с полупроводниковым кристаллом; $R_{\text{Si(Ge)}}$ – эффективный радиус столбообразной пустоты на поверхности кристалла кремния, который на основании рис. 3 равен $1,54 \cdot 10^{-9}$ м. Для столбообразной пустоты $\varepsilon_r = 1$. В уравнении (4) температура T_e является температурой электронного газа, которая на разных границах перехода может несколько отличаться от температуры корпуса транзистора [20]. В ряде случаев это следует учитывать.

Используя теорию размерностей на основании формулы (11) с учетом закона полного тока результирующий эффективный электрический ток смещения следует определить в виде

$$I_{\text{см}} = [(P_1 + P_2)S_1 \cdot 0,42 + P_3S_2 \cdot 0,58 + (P_4 + P_5)S_3]/U. \quad (13)$$

Здесь P_1 и P_2 – поток вектора Умова – Пойнтинга для мышьяка и индия в зоне эмиттера; P_3 – поток вектора Умова – Пойнтинга в базе; P_4 и P_5 – температурный поток вектора Умова – Пойнтинга для мышьяка и индия в зоне коллектора с учетом рассеяния и поглощения на глиноземе, применяемого на границах перехода между зонами; U – разность потенциалов, которая приложена между эмиттером и коллектором; S_1 , S_3 – площадь соответственно эмиттера и коллектора, где происходит ионизация отрицательных ионов атомов примеси мышьяка и индия; S_2 – то же базы, в которой происходит ионизация только атомов мышьяка. Формула (13) является вольт-амперной характеристикой как германиевого, так и кремниевого транзисторов.

Расчет токов смещения по (13) достаточно сложный, и поэтому был разработан алгоритм расчета и произведены соответствующие вычисления. В результате ток смещения под эмиттером определяется переводом отрицательных ионов мышьяка и индия под действием температуры и приложенного электрического поля. Ток смещения в базе определяется переводом в зону проводимости только отрицательных ионов мышьяка под действием температуры и приложенного электрического поля. При этом следует учитывать, что электрический ток смещения в базе, возникающий вследствие ионизации только мышьяка, не должен существенно отличаться от возникающего тока смещения в эмиттерной зоне. Чтобы как-то это обеспечить, электрические токи, возникающие в разных зонах транзистора, поверхности электродов увеличивают от эмиттера к коллектору с учетом падения напряжения на границах перехода от одной зоны к другой. После определения токов смещения в транзисторе рассмотрим, как формируются вольт-амперные характеристики в биполярном транзисторе и определим оптимальные условия функционирования этого вида техники с общим эмиттером.

Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора с общим эмиттером. Так как энергия сродства вводимых примесей в полупроводниковую основу располагается в зоне проводимости и при этом возникают токи смещения непосредственно в столбообразной пустоте, на гра-

нице перехода полупроводник – металл (алюминий) электромагнитная волна тока смещения изменяется вследствие ослабления скорости распространения и наличия диэлектрической прослойки в контакте между электродами, как показано на рис. 3.

Для кремниевого транзистора выполнен расчет токов смещения в зависимости от приложенного напряжения между эмиттером и коллектором. Результаты приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что при напряжении 7 и 8 В между эмиттером и коллектором в базе возникает электрический ток большой величины. При таких токах будет происходить мощный разогрев транзистора инфракрасным излучением внутри зоны проводимости и он может прекратить свою работу.

Таблица 1

Значения электрических токов в зависимости от приложенного напряжения в биполярном транзисторе между эмиттером и коллектором (BAX)
Values of electric currents depending on the applied voltage in a bipolar transistor between the emitter and collector (VAC – Volt-Ampere Characteristic)

Падение напряжения эмиттер – коллектор, В	8	7	6	5	4	3	2	1
Падение напряжения на эмиттере, В	3,36	2,94	2,52	2,10	1,58	1,26	0,84	0,42
Падение напряжения на базе, В	4,64	4,06	3,48	2,90	2,32	1,74	1,16	0,58
Электрический ток в эмиттере при ионизации индия, А	$3,79 \cdot 10^{-2}$	$7,98 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$6,18 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$
Электрический ток в эмиттере при ионизации мышьяка, А	$8,45 \cdot 10^{-6}$	$4,41 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,308 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$
Электрический ток в базе, А	7,80	0,613	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$0,90 \cdot 10^{-6}$

Наиболее оптимальная работа биполярного транзистора реализуется при подаче напряжения между коллектором и эмиттером 6 В. При таком напряжении электрический ток смещения в основном формируется в зоне эмиттера и составляет миллиамперы, а в зоне базы электрический ток не превышает микроампер. Полученные теоретически значения электрических токов соответствуют экспериментальным данным.

В электронике транзисторы применяются в основном для усиления электрических сигналов. Для этого на базу дополнительно подают напряжение от 2,5 до 3,0 В [2, 3]. В оптимальном режиме работы биполярного транзистора между базой и коллектором подается напряжение ~6 В. При этом напряжении на базе падение напряжения составляет ~3,48 В. Если на это напряжение накладывать дополнительно 2,5–3,0 В, то электрический ток в базе будет возрастать. Но и температура должна также возрастать. Конкретные расчеты электрического тока в зависимости от приложенного напряжения на базу и увеличения температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Электрический ток в базе, А, в зависимости от приложенного внешнего напряжения и увеличения температуры транзистора относительно 20 °С
Electric current in the base in amperes depends on the applied external voltage and the increase in transistor temperature relative to 20 °С

Изменение температуры относительно 20 °С	Дополнительное напряжение, подаваемое на базу, В					
	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$3,91 \cdot 10^{-4}$	$9,04 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$
5	$4,89 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	$6,51 \cdot 10^{-3}$

Получается, что увеличение напряжения в базе на 2,5–3,0 В приводит к возрастанию тока в базе и по порядку величины совпадает с током в эмиттере. В этих условиях коэффициент усиления биполярного транзистора на кремниевой основе будет максимально возможным. Экспериментальные данные теория подтверждает. Удивительно!

Важно также выяснить, как теория поясняет полученные вольт-амперные характеристики опытным путем. Воздействие внешнего электрического поля внутрь зоны проводимости кристалла полупроводниковой основы не проникает, поэтому не оказывает влияния на ионизацию отрицательных ионов. Свободные электроны внутри зоны проводимости возникают из-за воздействия только температуры. В зоне проводимости вследствие ионизации отрицательных ионов с повышением температуры экспоненциально возрастает концентрация свободных электронов. При заданной температуре возникает определенная величина тока смещения. На рис. 2 показана начальная область на оси изменения подаваемого напряжения от внешнего источника.

По мере возрастания подаваемого напряжения на транзистор тангенс угла наклона к оси ординат электрического тока смещения возрастает с увеличением температуры. Это обусловлено тем, что с повышением температуры возрастает общая мощность инфракрасного излучения и происходит заметный разогрев всей конструкции транзистора. Чтобы этот процесс уменьшить, максимально увеличивают массу коллектора.

С ростом температуры и при определенном приложенном напряжении включается термоавтоэлектронная эмиссия. Когда преодолевается работа выхода электронов из кристалла полупроводниковой основы, несколько возрастает ток смещения. При полном преодолении работы выхода из кристалла полупроводниковой основы в соответствии с вероятностью преодоления работы выхода, определяемой формулой (7), электрический ток равен нулю. Это экспериментально обнаружено (рис. 2).

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных теоретических исследований биполярного транзистора, в котором в качестве примесей использованы мышьяк

и индий, установлено, что его вольт-амперная характеристика определяется токами смещения.

2. Установлены условия, при которых биполярный транзистор обладает максимальным коэффициентом усиления.

3. Определены оптимальные условия функционирования биполярного транзистора с примесями мышьяка и индия: напряжение питания коллектор – эмиттер 6 В, тогда на эмиттере падение напряжения составляет 2,52 В, а на базе 3,48 В. Дополнительное напряжение на базу не должно превышать 3 В. Экспериментально эти значения полностью подтверждены.

4. Проведенные исследования позволили выяснить характер поведения вольт-амперной характеристики биполярного транзистора при разных напряжениях питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречихин, Л. И. Основы физики твердого тела, атомного ядра и плазмы / Л. И. Гречихин, Я. В. Ленец. Минск: МВИЗРУ, 1972. 271 с.
2. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
3. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс. 2013. 496 с.
4. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники: учеб. пособие / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 227 с.
5. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 302 с.
6. Гречихин, Л. И. Основы радиосвязи / Л. И. Гречихин. Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2016. 377 с.
7. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 2: Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 4. С. 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>.
8. Гречихин Л. И. Формирование p - и n -проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2022. № 6. С. 8–16.
9. Gretchikhin, L. I. Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors / L. I. Gretchikhin // Journal Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2018. Vol. 66, № 3. P. 304–321.
10. Гречихин, Л. И. Формирование p -, n -проводимости и p - n перехода / Л. И. Гречихин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 5. С. 231–238.
11. Gretchikhin, L. I. Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons / L. I. Gretchikhin // American Journal of Scientific Research. 2019. Vol. 5, No 3. P. 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
12. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на p - n переходе / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 3. С. 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229>.
13. Гречихин, Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 1: Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>.

Поступила 08.08.2025 Подписана в печать 10.10.2025 Опубликована онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. Gretchikhin L. I., Lenets Ya. V. (1972) *Fundamentals of Solid State, Nuclear, and Plasma Physics*. Minsk, Minsk Higher Engineering Anti-Aircraft Missile School. 271 (in Russian).
2. Zherebtsov I. P. (1990) *Basics of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
3. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Alyans Publ. 496 (in Russian).
4. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Principles of Electronics: Training Manual*. Minsk, Publishing House of Belarusian State Academy of Telecommunications. 227 (in Russian).
5. Gretchikhin L. I. (2008) *Physics. Electricity and Magnetism. Modern Electrodynamics*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 302 (in Russian).
6. Gretchikhin L. I. (2016) *Basics of Radio Communications*. Minsk, Publishing House of National Library of Belarus. 377 (in Russian).
7. Gretchikhin L. I. (2025). Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2. Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (4), 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310> (in Russian).
8. Gretchikhin L. I. (2022) Formation of p- and n-conductivity by negative ions. *The Aviation Herald*, 2022, (6), 8–16 (in Russian).
9. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p-, n-Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički glasnik = Military Technical Courier*, 66 (3), 304–321.
10. Gretchikhin L. I. (2018) The Formation of p-, n-Conductivity and p-n-Junction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 14 (5), 231–238. (in Russian).
11. Gretchikhin L. I. (2019) Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons. *American Journal of Applied Scientific Research*, 5 (3), 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
12. Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 1: Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the p-n Junction. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (3), 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229> (in Russian).
13. Gretchikhin L. I. (2025) Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 1. Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (6), 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503> (in Russian).