

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>

УДК 53(075.3)

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

Часть 1

Строение полупроводникового твердого тела,
легированного мышьяком и индием

Л. И. Гречихин¹⁾

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

Реферат. Биполярные транзисторы в электронике являются основной элементной базой. Развитие этой базы осуществлялось преимущественно опытным путем. Для обоснования работы транзистора применялись качественные представления в виде двойного $p-n$ перехода вида $p-n-p$ или $n-p-n$ проводимости. При таком обосновании многие свойства работающего полупроводникового транзистора оставались за пределами их четкого представления. Поэтому в настоящей работе рассмотрено устройство биполярного транзистора с учетом строения твердого тела полупроводниковой основы и взаимодействия с поверхностью твердого тела атомов в виде отрицательных ионов. На основании анализа данных, полученных туннельным микроскопом, поверхность твердого тела покрыта мономолекулярной пленкой, а сам кристалл полупроводниковой основы сформирован положительно заряженными атомами и находится под мономолекулярной пленкой. Молекулярная пленка формируется поверхностными кластерами, а кристалл – объемными кластерами. Взаимодействие поверхностных кластеров создает пористую структуру молекулярной пленки. Через эти поры виден кристалл твердого тела. Примеси в виде отдельных молекул на поверхность кристалла проникают через отверстия в молекулярной пленке, сформированные в виде столбообразных пустот. На поверхности кристалла молекулы примеси вследствие обменного взаимодействия диссоциируют на отдельные атомы, которые в свою очередь также вследствие обменного взаимодействия превращаются в отрицательные ионы. Конкретно рассмотрено легирование поверхности полупроводникового кристалла германия или кремния молекулами мышьяка и индия. После распада молекул на атомы в столбообразных пустотах происходит их превращение в отрицательные ионы, которые блокируют проникновение других молекул в эти пустоты.

Ключевые слова: биполярный транзистор, отрицательный ион, мономолекулярный слой, кристалл, двойной электрический слой

Для цитирования: 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>

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 1

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. Bipolar transistors are the main element base in electronics. The development of this base was carried out mainly through experimentation. To justify the operation of the transistor, qualitative representations were used in the form of a double $p-n$ junction of the $p-n-p$ or $n-p-n$ conductivity type. With this justification, many properties of a working semiconductor transistor remained beyond their clear understanding. Therefore, in this paper, the design of a bipolar transistor is considered, taking into account the structure of the solid body of the semiconductor base and the interaction of atoms in the form of negative ions with the surface of the solid body. Based on the analysis of data obtained by a tunneling microscope, the surface of the solid is covered with a monomolecular film, and the crystal of the semiconductor base itself is formed by positively charged atoms and is located under the monomolecular film. The molecular film is formed by surface clusters, and the crystal is formed by volume clusters. The interaction of surface clusters creates a porous structure of the molecular film. Through these pores the crystal of the solid body is visible. Impurities in the form of individual molecules penetrate the surface of the crystal through holes in the molecular film, formed in the form of columnar voids. On the surface of the crystal, impurity molecules, as a result of exchange interaction, dissociate into individual atoms, which in turn, also as a result of exchange interaction, are converted into negative ions. The doping of the surface of a semiconductor crystal of germanium or silicon with arsenic and indium molecules is specifically considered. After the molecules disintegrate into atoms in the columnar voids, they are converted into negative ions, which block the penetration of other molecules into these voids.

Keywords: bipolar transistor, negative ion, monomolecular layer, crystal, electrical double layer

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503> (in Russian)

Введение

Создание транзистора в середине XX в. отмечено Нобелевской премией в 1956 г., которая была вручена Джону Бардину, Уолтеру Браттейну и Уильяму Шокли. Это событие послужило основой быстрого развития электронной техники (электроники) и внедрения этой техники практически во все области человеческой деятельности. Такое быстрое развитие электроники происходило преимущественно опытным путем на уровне интуиции. Теоретическое обоснование полученных опытных результатов осуществлялось эмпирически, т. е. путем использования математических формул, позволяющих как-то описать полученные экспериментальные данные в модельном представлении.

Устройство транзистора достаточно простое. Полупроводниковый кристалл германия или кремния легируется примесями. Разработаны три технологии введения примесей: сплавная, диффузионная и эпитаксильная. В настоящее время в основном используется диффузионная технология. Во всех технологиях введенные примеси являются донорами или акцепторами свободных электронов. Полагали, что донорами являются атомы мышьяка, фосфора или сурьмы. Эти примеси при введении в полупроводник отдают свой один из валентных трех электронов, а сами остаются в виде положительно заряженной «дырки». В этом случае полупроводниковый материал получил название *n*-типа, так как решили, что электрический ток в основном поддерживают электроны, а не положительно заряженные «дырки» [1–3].

При легировании полупроводникового материала трехвалентными атомами индия (In) или атомами бора, алюминия, галлия эти атомы отдают свои три валентных электрона трем соседним атомам. Это создает в ковалентной связи «дырку». Полагали, что наличие дополнительных «дырок» позволяет электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как «дырки» легко захватывают электроны, то атомы, которые вносят в полупроводнике дополнительные «дырки», являются акцепторами. При обычных условиях количество «дырок» в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, «дырки» в электрическом токе в этом случае являются основными носителями электрических зарядов, а электроны – не основными. Так как основные носители «дырки» обладают положительным зарядом, такой материал назвали полупроводником *p*-типа [1–3]. Такое представление о работе *p–n* перехода в транзисторах является чисто качественным. На таких представлениях полностью понять, как работает полупроводниковый транзистор, не представляется возможным.

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 вводили один тип примеси, а между ними – другой и полагали, что возникают два варианта проводимостей: *n–p–n* или *p–n–p*. При таком обосновании многие явления, возникающие в транзисторе, невозможно предвидеть и, что очень важно, обосновать условия его оптимальной работы. В этой связи необходимо детально выяснить структуру транзистора и то, почему эта структура позволяет регулировать прохождение электрических токов через транзистор.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать структуру полупроводниковой основы;

- выяснить, что происходит, когда полупроводниковая основа легируется разными элементами;
- определить энергию связи введенных примесей в полупроводниковую основу.

Основная часть

Структура полупроводниковой основы. При производстве транзисторов в качестве полупроводниковой основы применяются в твердом состоянии кремний или германий с поверхностью кристалла в индексах Миллера (111), которая обладает максимальной плотностью атомов на поверхности кристалла, а сама поверхность является идеально плоской. Такая поверхность экспериментально подробно изучена применительно к кремнию туннельным микроскопом [4–7]. Результат приведен на рис. 1.

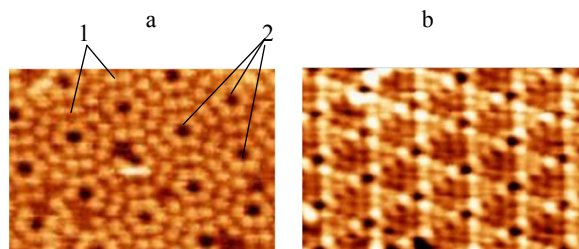


Рис. 1. Поверхность из трехатомных молекул кремния при подаче напряжения на зонд в туннельном микроскопе +2 В (а) и –2 В (б): 1 – двухпарные трехатомные молекулы; 2 – столбообразные пустоты на поверхности из трех двухпарных молекул

Fig. 1. Surface of triatomic silicon molecules with a probe voltage of +2 V (a) and –2 V (b) applied in a tunneling microscope: 1 – two-pair triatomic molecules; 2 – columnar voids on the surface of three two-pair molecules

При напряжении +2 и –2 В, подаваемом на зонд микроскопа с высоким пространственным разрешением, можно «видеть» каждую отдельную частицу. Размер отдельных частиц на поверхности кремния соответствует трехатомным молекулам, у которых в центре встроен положительный или отрицательный электрический заряд. Процесс формирования поверхности в твердом полупроводнике из трехатомных молекул происходит в такой последовательности: две молекулы с разным электрическим зарядом в центре соединяются в парные образования. Затем три парные образования создают основной поверхностный кластер. Основные поверхностные кластеры между собой связаны парной структурой. Последовательность формирования поверхности в твердом теле из трехатомных молекул представлена на рис. 2. В центре основного поверхностного кластера возникает столбообразная пустота (черная окружность), которая опирается на кристалл полупроводника. Размер столбообразной пустоты и соответствующих примесей позволяет непосредственно на кристалле германия или кремния внутри столбообразной пустоты разместиться одной трехатомной молекуле или одной двухатомной молекуле вводимых примесей мышьяка и индия.

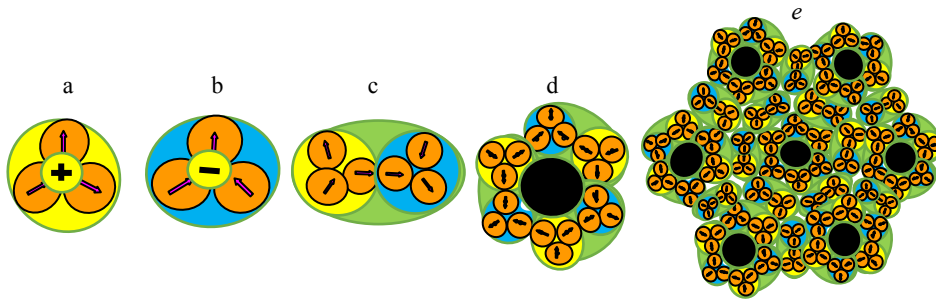


Рис. 2. а – трехатомная молекула с положительным зарядом в центре; б – трехатомная молекула с отрицательным зарядом в центре; с – парная конструкция из трехатомных молекул; d – основной поверхностный кластер из трехатомных молекул, в центре которых находится столбообразная пустота; е – элемент поверхности твердого тела из основного кластера, вокруг которого расположены парные образования, объединяющие поверхностные основные кластеры

Fig. 2. a – triatomic molecule with a positive charge at the center; b – triatomic molecule with a negative charge at the center; c – paired structure of triatomic molecule; d – main surface cluster of triatomic molecule, in the center of which there is a columnar void; e – solid surface element from a primary cluster, around which paired formations are located, combining surface primary clusters

Процесс образования молекулярных структур из двухатомных молекул при легировании их на полупроводниковую основу показан на рис. 3. При изготовлении транзисторов интерес представляет поверхность, состоящая из одинаковых двухатомных молекул. Экспериментально на туннельном микроскопе были проведены исследования изменения поверхности кремния при легировании индием [6].

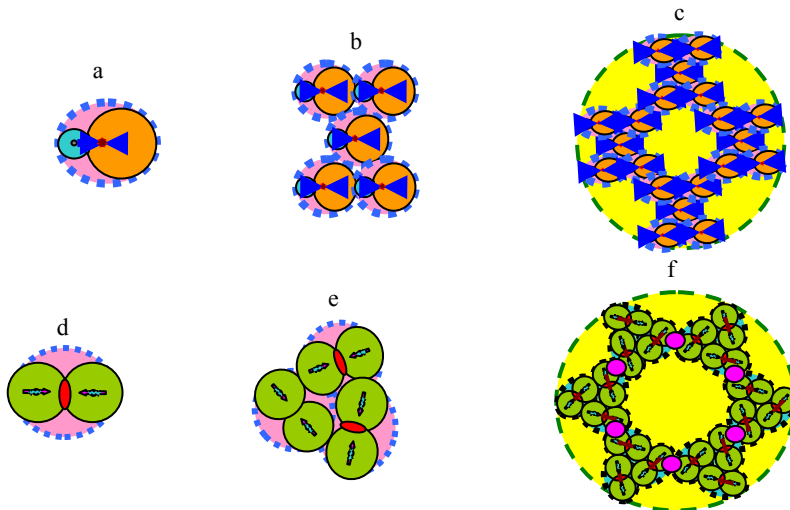


Рис. 3. а – двухатомная молекула из разных атомов; б – промежуточный кластер; с – основной кластер из двухатомных молекул разных атомов; d – двухатомная молекула из одинаковых атомов; е – промежуточный кластер; f – основной поверхностный кластер из одинаковых атомов

Fig. 3. a – diatomic molecule made up of different atoms; b – intermediate cluster; c – basic cluster of diatomic molecules of different atoms; d – diatomic molecule made up of identical; e – intermediate cluster; f – basic surface cluster of identical atoms

Результаты легирования полупроводниковой основы поверхности кремния молекулами индия в зависимости от времени легирования показаны на рис. 4 [6].

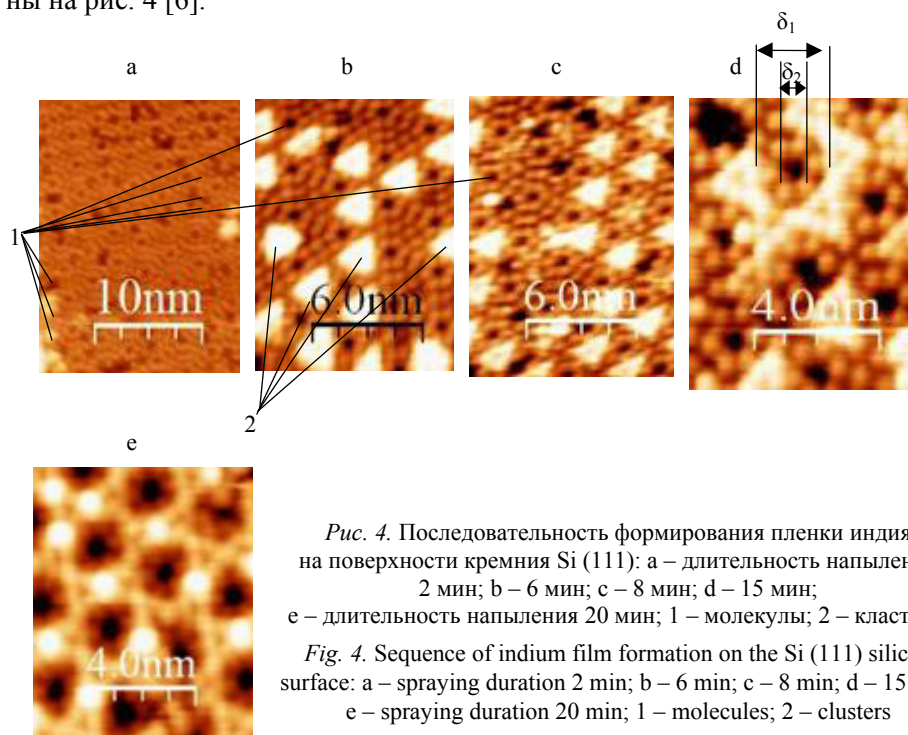


Рис. 4. Последовательность формирования пленки индия на поверхности кремния Si (111): а – длительность напыления 2 мин; б – 6 мин; в – 8 мин; д – 15 мин; е – длительность напыления 20 мин; 1 – молекулы; 2 – кластеры

Fig. 4. Sequence of indium film formation on the Si (111) silicon surface: а – spraying duration 2 min; б – 6 min; в – 8 min; д – 15 min; е – spraying duration 20 min; 1 – molecules; 2 – clusters

Формирование поверхности полупроводниковой основы после легирования. В начальный момент легирования, когда индий был нагрет строго до температуры кипения, преимущественно испарялись молекулы индия (рис. 4а). Поверхность кремния оказалась практически чистой, и достаточно редко видны молекулы индия. Практически все молекулы индия были поглощены столбообразными пустотами и дефектами поверхностного слоя кремния. Некоторые молекулы индия осаждались между молекулами, которые формируют столбообразную пустоту, и не проникали внутрь столбообразной пустоты (рис. 4д). По мере увеличения времени легирования температура жидкого индия несколько уменьшалась, и это приводило к испарению преимущественно основных кластеров индия (треугольники на рис. 4б). В этом случае поток испарения кластеров значительно превосходит поток испарения молекул индия. Это обусловлено тем, что в соответствии с выполненными оценками силы поверхностного натяжения для молекул отличны от нуля, а для кластеров почти равны нулю.

Масса основных кластеров из двухатомных молекул в потоке значительно больше массы отдельных молекул индия. Поэтому в процессе испарения вблизи температуры кипения у жидкой поверхности индия отдельные молекулы и основные поверхностные кластеры образуют «пар», и на полупроводниковую поверхность внутрь столбообразных пустот осажда-

ются преимущественно только двухатомные молекулы индия или трехатомные молекулы мышьяка.

Из рис. 4d следует, что столбообразная пустота, сформированная на поверхности кристалла германия или кремния, в процессе интенсивного легирования остается постоянно открытой. На поверхность кристалла в столбообразную пустоту осаждается трехатомная или двухатомная молекула, и происходит полная блокировка дальнейшего проникновения в столбообразную пустоту других молекул примеси. Это обусловлено малой энергией связи молекул с атомами внутри и существенно большей энергией связи с молекулами вокруг столбообразной пустоты [6].

Внутренняя структура твердого тела (кристалла) формируется объемными кластерами¹. Формирование твердого тела объемными кластерами рассмотрено в работах автора [8, 9]. В результате установлено, что в узлах кристаллической структуры находятся положительно заряженные ионы ядер атомов кристалла, а между ядрами атомов находятся электроны, которые не свободные, а хаотически обмениваются между атомами первой, второй и третьей координационных сфер внутри кристаллической решетки. В результате возникает эффект как бы свободных электронов.

Распределение электронов по энергиям внутри кристаллической решетки экспериментально получено рентгеноскопией, а строгая теория разработана и описана в работах [10, 11], что позволило определить величину смещения границы ионизации атомов, зону проводимости и запрещенную зону кристалла до уровня Ферми.

В качестве основы в транзисторах используют кремний или германий. Эти элементы формируются трехатомными молекулами [6]. Результаты расчета распределения электронов по энергиям для кристаллов кремния и германия приведены на рис. 5 [10].

Процесс легирования полупроводников осуществляется трехатомными или двухатомными молекулами [15, 16]. Поэтому внутрь столбообразной пустоты кремния или германия будут осаждаться в основном трехатомные молекулы мышьяка или двухатомные молекулы индия (рис. 6). Внедренные молекулы на поверхности полупроводникового кристалла самопроизвольно распадаются на атомы. Атомы на поверхности кристалла полупроводниковой основы внутри столбообразной пустоты вследствие обменного взаимодействия пребывают в виде отрицательных ионов (рис. 6). На основании этих данных была получена концентрация атомов примеси в столбообразной пустоте и в среднем на всей легированной площади полупроводниковой основы. Рассмотрим последовательно, как это происходит.

¹ Экспериментально Г. А. Месяцем [12–14] было установлено, что в катодном пятне мощного дугового разряда разрушение осуществляется отдельными частицами эктонами, полученный размер которых совпадает с объемными кластерами, т. е. эктоны – это объемные кластеры, которые формируют кристалл [14].

На основании рис. 6d эффективный радиус столбообразной пустоты для кремния равен $3,5 \text{ \AA}$, а для германия с учетом разности размеров атомов составляет $3,796 \text{ \AA}$. На каждую столбообразную пустоту на поверхности кремния приходится круговая поверхность радиусом $r_k = 1,54 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Следовательно, при 20 % дефектности эффективная поверхностная плотность столбообразных пустот для кремния составит $\sim 1,07 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$, а для германия это $\sim 8,73 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

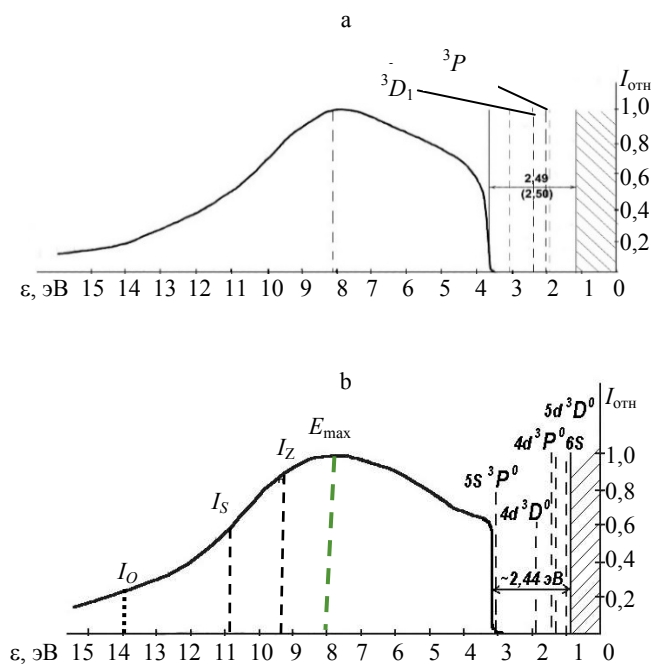


Рис. 5. Распределение электронной плотности по энергиям для:
а – кремния; б – германия [10, 11].

Fig. 5. Distribution of electron density by energy for:
a – silicon; b – germanium [10, 11].

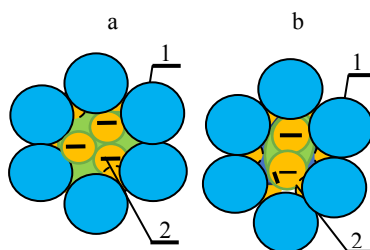


Рис. 6. Расположение внутри столбообразной пустоты полупроводниковой основы:
а – трехатомных молекул мышьяка; б – двухатомных молекул индия;
1 – молекулы полупроводника; 2 – атомы примеси

Fig. 6. Arrangement a columnar void of the semiconductor base:
а – triatomic arsenic molecules; б – diatomic indium molecules inside;
1 – semiconductor molecules; 2 – impurity atoms

При температуре кипения испарение мышьяка происходит желтого цвета, твердое тело которого обладает кубической структурой. Такая структура кристалла создается трехатомными молекулами. Поэтому легирование полупроводниковой основы мышьяком происходит трехатомными молекулами, а индий заполняет столбообразные пустоты двухатомными молекулами. При этом в столбообразную пустоту проникает только одна молекула.

Все тела в природе стремятся занять минимум потенциальной энергии. Поэтому на поверхности кристалла полупроводника происходит самопроизвольный распад трехатомных молекул мышьяка и двухатомных молекул индия на атомы. Эффективная предельная концентрация введенных примесей в кремний атомов мышьяка составляет $5,04 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$, а для германия это $3,95 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Соответственно при полном заполнении столбообразных пустот атомами индия эти концентрации остаются прежними. Полного заполнения столбообразных пустот в процессе легирования полупроводниковой основы примесями получить невозможно. Однако в этом нет необходимости. После завершения процесса легирования все столбообразные пустоты полностью заполнены атомами мышьяка и индия, которые пребывают в виде отрицательных ионов.

Энергия связи отрицательных ионов с кристаллом полупроводниковой основы. Энергетическая схема в биполярных транзисторах, которая реализуется при легировании кремния и соответственно германия мышьяком и индием, приведена на рис. 7. Начало отсчета энергии (0) соответствует рис. 5.

Экспериментально доказано, что легирование поверхности полупроводниковой основы происходит только на глубину мономолекулярного слоя [15, 16]. В результате коллективного взаимодействия атомов примеси на поверхности кристалла в столбообразных пустотах их эффективная энергия связи возрастает до энергии смещения границы ионизации атомов полупроводниковой основы. Отрицательный ион на поверхности кристалла полупроводниковой основы в соответствии с рис. 7 связан с основной энергией

$$\Delta E = \Delta E_i - E_A, \quad (1)$$

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.

Переход (1) для отрицательного иона не запрещен, и он происходит в зоне проводимости вследствие перехода из связанного состояния в свободное состояние (рис. 5). Образующийся положительный заряд в начале зоны проводимости своим полем компенсирует поле, создаваемое отрицательными ионами примеси.

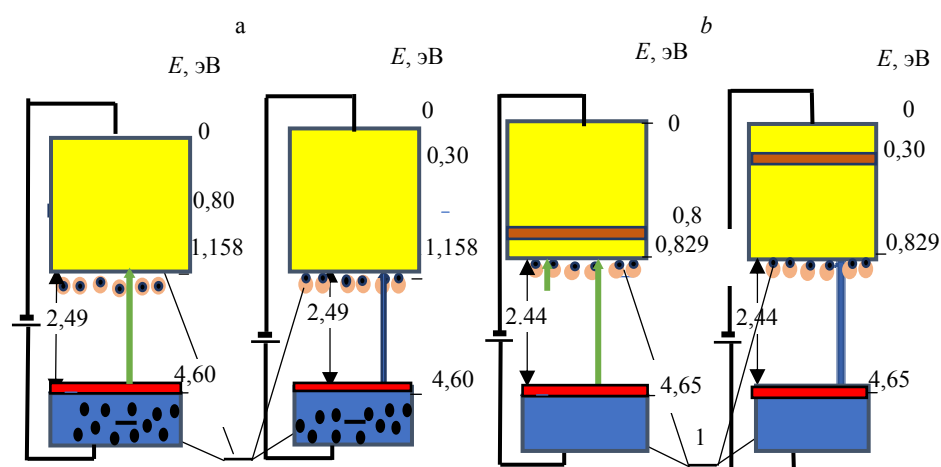
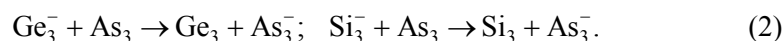


Рис. 7. Энергетическая схема расположения примесей в столбообразной пустоте при легировании поверхности (111) мышьяком и индием: а – кремния; б – германия, 1 – связанные электроны

Fig. 7. Energy diagram of the impurity distribution in a columnar void when the (111) surface is alloyed with arsenic and indium: а – silicon; б – germanium, 1 – bound electrons

Молекулы примесей, которые осаждаются на поверхностный слой вокруг столбообразной пустоты полупроводниковой основы германия или кремния (рис. 4d), непосредственно взаимодействуют с молекулами поверхностного слоя полупроводниковой основы, т. е. в конечном итоге с катодом и анодом из алюминия. В этом случае образование отрицательных ионов молекул примеси происходит более сложным образом.

Следует учитывать, что молекулы поверхностного слоя германия или кремния также обладают энергией сродства к электрону и тогда взаимодействовать осажденные молекулы будут уже с молекулами поверхностного слоя полупроводниковой основы вокруг столбообразных пустот, т. е. с молекулами германия или кремния. Произойдет взаимодействие между отрицательными ионами молекул полупроводниковой основы и осажденными молекулами примеси с образованием отрицательных ионов трехатомных молекул [15, 16]. При этом реализуются реакции обмена электронами между молекулами вокруг столбообразной пустоты следующего вида:



С учетом влияния температуры реакции (2) возникают достаточно эффективно. В этом случае знакопеременная структура поверхности не нарушается, но ионизация отрицательных ионов молекул не происходит, так как электроны в трехатомных молекулах примеси находятся в связанном состоянии с энергией сродства более 2–4 эВ [17]. Поэтому такие электроны в принципе не могут участвовать в формировании электрического тока проводимости или смещения, так как являются связанными достаточно прочно на основании рис. 6а, а также размеров атомов и молекул (табл. 1).

Таблица 1

**Значения радиусов атомов в кристалле, молекуле и свободных атомах,
а также сродство к электрону и встроенного атомного электрического момента
в атомах и молекулах**

**Atomic radius values in crystals, molecules, and free atoms,
as well as electron affinities and built-in atomic electric moments
in atoms and molecules**

Параметр	Осаждаемые частицы и основа				
	Германий	Кремний	Мышьяк	Индий	Алюминий
Радиус атома в кристалле, Å	1,39	1,18	1,200	1,66	1,43
Радиус свободного атома, Å	1,536	1,475	1,390	1,998	1,817
Радиус молекулы, Å	2,210	2,122	3,226	3,336	2,614
Сродство к электрону атомов, эВ	1,23	1,5 (1,38)	0,81	0,3	0,44
Дипольный электрический момент атома, Кл·м ·10 ³⁰	2,618	5,10	2,980	1,331	3,41
Величина заряда в центре молекулы, Кл·10 ²⁰	1,704	3,458	1,908	–0,666	2,135

Каждая молекула в столбообразной пустоте распадается на атомы, которые превращаются в отрицательные ионы. На три отрицательных иона мышьяка и на два отрицательных иона индия в центре столбообразной пустоты полностью воздействует приложенное внешнее электрическое поле. При известном объеме столбообразной пустоты и количества в ней отрицательных ионов определяется их концентрация, а при заданной температуре и приложенном внешнем электрическом поле происходит процесс ионизации отрицательных ионов и возникает электрический ток смещения. Как это происходит, рассмотрим во второй части.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ строения твердого тела, поверхность которого формируется молекулами, а внутренняя область – это кристалл. Молекулы на поверхности группируются в поверхностные кластеры с образованием и межкластерных столбообразных пустот, через которые виден кристалл. Кристалл формируется объемными кластерами.

2. Нанесение покрытий на поверхность твердого тела осуществляется молекулами и даже поверхностными кластерами. Молекулы проникают в столбообразные пустоты, где распадаются на атомы с превращением в отрицательные ионы.

3. Отрицательные ионы в транзисторах располагаются в зоне проводимости полупроводниковой основы, и их ионизация приводит к формированию переменного электрического поля в этой зоне.

4. Отрицательные ионы внутри столбообразной пустоты расположены в зоне проводимости, и это не позволяет в процессе легирования проникать в зону проводимости более одной молекулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
2. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника, учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс, 2013. 496 с.
3. 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.
4. 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.
5. Binning, G. Scanning Tunneling Microscopy / G. Binning, H. Rohrer // Helvetica Physica Acta. 1982. Vol. 55, No 6. P. 726–735. <https://doi.org/10.5169/seals-115309>.
6. Гречихин, Л. И. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк. Берлин: Lambert. Academic Publishing, 2015. 80 с.
7. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // Авиационный вестник. 2021. № 5. С. 21–28.
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, No 2. P. 304–321.
10. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.
11. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 406 с.
12. Месяц, Г. А. Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. М.: Наука, 2000. 424 с.
13. Месяц, Г. А. Эктон в электрических разрядах / Г. А. Месяц // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57, вып. 2. С. 88–90.
14. Месяц, Г. А. Эктон – лавина электронов из металла / Г. А. Месяц // УФН. 1995. Т. 165, № 6. С. 601–626. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199506a.0601>.
15. 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>.
16. 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>.
17. Физические величины: справ. / А. И. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. Д. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

REFERENCES

1. Zherebtsov I. P. (1990) *Basics of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
2. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Al'yans Publ. 496 (in Russian).
3. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Principles of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Telecommunications. 227 (in Russian).
4. 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).
5. Binning G., Rohrer H. (1982) Scanning tunneling microscopy. *Helvetica Physica Acta*, 55 (6), 726–735. <https://doi.org/10.5169/seals-115309>.
6. Gretchikhin L. I., Schmerbeck Yu. (2015) *Studies of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin: Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
7. Gretchikhin L., Shmerbekk J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (in Russian).
8. Gretchikhin L. I. (2022) Formation of p - and n -conductivity by negative ions. *The Aviation Herald*, 2022, no. 6, pp. 8–16 (in Russian).
9. Gretchikhin L. (2018) Formation of p -, n -conductivity in semiconductors. *Vojnotehnički Glasnik = Military Technical Courier*, 66 (2), 304–321. <https://doi.org/10.5937/vojtehg66-15935>.
10. Gretchikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 399 p. (in Russian).
11. Gretchikhin L. I. (2008) *Nanoparticles and Nanotechnology*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 406 (in Russian).
12. Mesyats G. A. (2000) *Ectons in a Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc*. Moscow, Nauka Publ. 424 (in Russian).
13. Mesyats G. A. (1993) Ectons in electric discharges. *JETP Letters*, 57 (2), 95–98.
14. Mesyats G. A. (1995) Ecton or electron avalanche from metal. *Physics-Uspekhi*, 38 (6), 567–590. <https://doi.org/10.1070/pu1995v038n06abeh000089>.
15. 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).
16. 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).
17. Babichev A. I., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V., Vinogradov B. V. [et al.], I. S. Grigoriev, E. D. Meylikhov (eds.) (1991) *Physical Quantities: Reference Textbook*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).

Received: 8 August 2025

Accepted: 10 October 2025

Published online: 28 November 2025