

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>

УДК 53 (075.3)

Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник

Часть 2

Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник

Л. И. Гречихин¹⁾

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

Реферат. Вольт-амперные характеристики разных диодов и стабилитронов получены опытным путем и существенно отличаются от опыта к опыту. Как правильно обосновать причину таких отличий, неясно. В этой связи возникла проблема в разработке теоретических основ производства такого вида техники на достаточно обоснованной теоретической базе с учетом последних достижений в электротехнике и электронике. В результате рассмотрен процесс формирования токов проводимости и токов смещения в контакте металл – полупроводник. В качестве металла применен алюминий, а в качестве полупроводника – германий и кремний. При прямом приложенном внешнем напряжении разработана теория расчета вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов. Показано, что энергия сродства атомов полупроводниковых материалов на катоде несколько возрастает вследствие связи отрицательных ионов с электрическими диполями атомов поверхностного слоя молекул алюминия внутри столбообразной пустоты и при этом формируется электрический ток проводимости путем движения электронов от катода к аноду. Концентрация электронов вследствие ионизации отрицательных ионов определяется не температурой непосредственно диода, а уменьшенной температурой электронного газа внутри алюминия вследствие преодоления контактной разности потенциалов на $p-n$ переходе. На аноде происходит последовательное накопление отрицательного заряда электронов, что определяет превращение тока проводимости в ток смещения, так как энергия электронов в этом случае не превышает энергию работы выхода из кристалла алюминия. При обратном приложенном напряжении величина энергии сродства отрицательных ионов атомов примеси у анода остается прежней вследствие ионизации отрицательных ионов с учетом возрастания температуры электронного газа на $p-n$ переходе с возникновением тока смещения. Электрический ток проводимости возникает с кристалла алюминия, выполняющего роль катода, внутри столбообразной пустоты вследствие термоавтоэлектронной эмиссии. Ток проводимости у анода превращается в ток смещения, который поступает во внешние электрические провода. Внутренние стенки столбообразной пустоты являются хорошим диэлектриком и поэтому хорошо проводят ток смещения внутри столбообразной пустоты. Ток проводимости в этом случае выполняет роль усилителя результирующего электрического тока.

Ключевые слова: диод, стабилитрон, вольт-амперная характеристика, ток проводимости, ток смещения, термоавтоэлектронная эмиссия, энергия сродства, работа выхода

Для цитирования: 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>

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, Ubovich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes

Part 2

Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution “Belarusian State Academy of Communication”

Abstract. The volt-ampere characteristics of different diodes and zener diodes are obtained experimentally, and they differ significantly from experience to experience. It is unclear how to properly substantiate the reason for such differences. In this regard, a problem arose in developing the theoretical foundations for the production of this type of equipment on a sufficiently sound theoretical basis, taking into account the latest advances in electrical engineering and electronics. As a consequence, the process of formation of conduction currents and displacement currents in a metal–semiconductor contact is considered. Aluminum was used as a metal, and germanium and silicon were used as a semiconductor. With a direct applied external voltage, a theory for calculating the volt-ampere characteristics of germanium and silicon diodes has been developed. It is shown that the affinity energy of atoms of semi-conductor materials at the cathode increases slightly due to the coupling of negative ions with electric dipoles of atoms of the surface layer of aluminum molecules inside a columnar void, and an electric conduction current is formed by the movement of electrons from the cathode to the anode. The electron concentration due to the ionization of negative ions is determined not by the temperature of the diode itself, but by the reduced temperature of the electron gas inside the aluminum due to overcoming the contact potential difference at the p - n junction. A sequential accumulation of negative electron charge occurs at the anode, which determines the conversion of the conduction current into a displacement current, since the electron energy in this case does not exceed the energy of the aluminum work function of the crystal. At the reverse applied voltage, the affinity energy of the negative ions of the impurity atoms at the anode remains the same due to the ionization of the negative ions, taking into account an increase in the temperature of the electron gas at the p - n junction with an increase in the displacement current. An electric conduction current arises from an aluminum crystal acting as a cathode inside a columnar void due to thermoautoelectronic emission. The conduction current at the anode is converted into a displacement current, which enters the external electrical wires. The inner walls of the columnar void are a good dielectric and therefore they sufficiently conduct displacement current inside the columnar void. The conduction current in this case acts as an amplifier of the resulting electric current.

Keywords: diode, zener diode, volt-ampere characteristic, conduction current, displacement current, thermoautoelectronic emission, affinity energy, work function

For citation: Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2: Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310> (in Russian)

Введение

Основной характеристикой выпрямительных диодов и стабилитронов является вольт-амперная характеристика (ВАХ), которая отражает зависимость электрического тока анода I_a от величины приложенного напряжения между катодом и анодом U_{a-k} и определяется зависимостью $I_a = f(U_{a-k})$. Для анализа работы диодов с термоэмиссионным катодом проблем нет. Автоэлектронная эмиссия хорошо разработана, и вольт-амперные характе-

ристики в этом случае теоретически представляются формулой Гречихина [1]. Реально в полупроводниковых германиевых и кремниевых диодах ситуация достаточно запутанная и сложная. Попытки как-то качественно обосновать, каким образом формируется $p-n$ переход в этих диодах, подробно рассмотрено в работах [2–4]. Вольт-амперные характеристики, полученные опытным путем, существенно отличались от диода к диоду. Поэтому вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов представляли чисто качественно. В качестве примера на рис. 1 показана такая вольт-амперная характеристика без указания конкретных значений выполненных измерений.

При таком представлении вольт-амперной характеристики невозможно понять физику работы диода на основе металл – полупроводник даже качественно. Как правило, при изучении вольт-амперных характеристик использовались диоды промышленного изготовления без тщательного анализа технологии их производства. Поэтому получали результаты для диодов разных изготовителей и для одной и той же изготовленной партии. В этой связи на рис. 1 приведен обобщенный результат для многих диодов. Кроме этого, электрический ток измерялся во внешней электрической цепи, а то, как формировался электрический ток внутри диода, оставалось вне поля зрения, а само определение электрического тока не соответствовало определению тока, данному еще Максвеллом.

Максвелл, анализируя все законы электромагнетизма, полученные опытным путем, представил математически в обобщенном виде. На этой основе стало ясно, что в природе существуют только два вида электрических токов: ток проводимости и ток смещения. В совокупности эти токи определяются законом полного тока. Оба этих тока переносят энергию, которая определяется законом Джоуля – Ленца. Механизм переноса энергии этими токами разный [5]. В токе проводимости перенос энергии определяется движением свободных электрических зарядов, а в токе смещения – изменением электрического поля, т. е. вектором Умова – Пойнтинга.

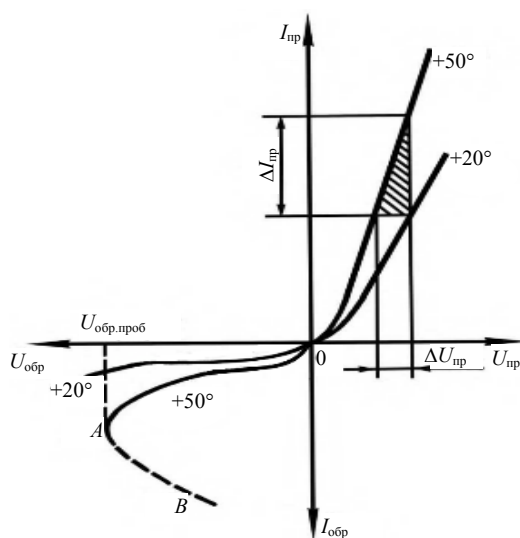


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода металл – полупроводник при прямом и обратном приложенном напряжении в качественном представлении

Fig. 1. Volt-ampere characteristic of a metal-semiconductor diode at direct and reverse applied voltage in a qualitative view

Полученные экспериментально вольт-амперные характеристики пытались аппроксимировать разными функциями, т. е. создавались эмпирические зависимости. Все попытки создать теорию вольт-амперных характеристик в соответствии с экспериментом не увенчались успехом. В общем случае электрический ток для движущихся свободных электронов определяется по формуле [5]

$$I = en_e v_e S. \quad (1)$$

Здесь e – заряд электрона; n_e – концентрация свободных электронов; v_e – подвижность электронов; S – площадь сечения, через которую движутся свободные электроны.

Общая площадь электродов, применяемых в электронике, составляет не более 100×100 мкм² [3, 4]. Электрический ток, определяемый по формуле (1), Максвелл определил как ток проводимости. Все величины, входящие в (1), кроме заряда электрона и площади, по которой распространяется электрический ток, неясно, как определять.

Аналогичная ситуация имеет место и для движения положительно заряженных дырок. Положительно заряженные дырки создаются положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые внутри кристалла покоятся и совершают движение, создавая электрический ток, не в состоянии. Поэтому для положительно заряженных дырок формула (1) не применима в принципе.

В контакте металл – полупроводник с возникновением p – n перехода ситуация более сложная и запутанная. Это хорошо видно из вольт-амперных характеристик, измеренных экспериментально для специально изготовленных диодов, которые приведены на рис. 2¹ [3]. Из вольт-амперных характеристик многое непонятно. Почему возникают такие сложные зависимости? При постоянном приложенном напряжении электрический ток очень быстро возрастает, а при обратном приложенном напряжении возникает область линейной зависимости электрического тока от приложенного напряжения. В кремниевом диоде с ростом приложенного обратного напряжения тангенс угла наклона несколько возрастает при увеличении температуры, а в германиевом диоде остается постоянным и равен нулю. Такую странную зависимость электрического тока от приложенного обратного напряжения невозможно даже качественно объяснить с позиций возникновения p - и n -проводимости в контакте металл – полупроводник.

Кроме этого, почему для кремниевого и германиевого диодов при прямом одинаковом напряжении электрический ток отличается на порядок, а при подаче обратного напряжения вольт-амперные характеристики существенно изменяются?

¹ В данном случае измерения ВАХ были выполнены на специально изготовленных диодах. Во многих случаях ВАХ измеряют для конкретных диодов, выпускаемых промышленностью. То, как влияет технология изготовления на ВАХ, остается неясным.

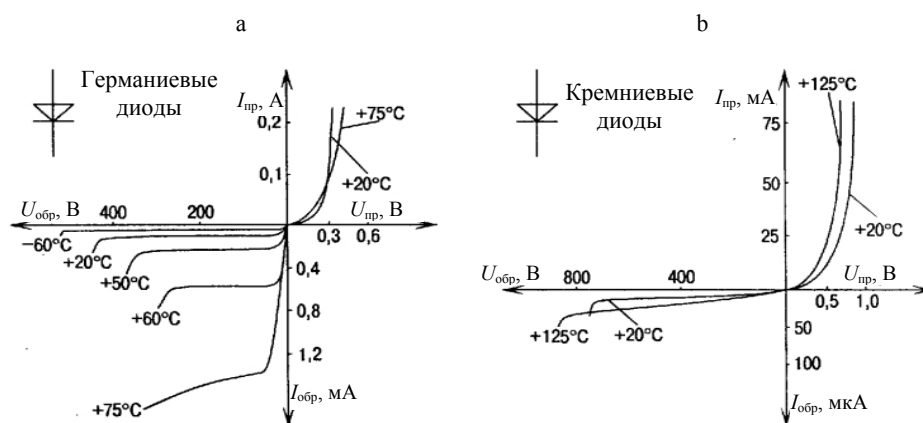


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода: а – германиевого; б – кремниевого

Fig. 2. Volt-ampere characteristics of a – germanium diode; b – silicon diode

При обратном приложенном напряжении для германиевого диода с ростом температуры максимальные подаваемые напряжения разнятся весьма существенно. Для кремниевого диода все наоборот: с ростом температуры подаваемое обратное напряжение возрастает. Еще интересный факт. Заканчивается вольт-амперная характеристика для германиевого диода экспоненциальным ростом тока проводимости, который увеличивается с повышением температуры, а для кремниевого диода этот рост незначительный и практически постоянный для разных температур. Все это настолько парадоксально, что наши представления о работе кремниевых и германиевых диодов остаются на уровне интуиции каждого производителя этого вида техники.

В этой связи возникла цель: рассмотреть контакт металл – полупроводник с позиций образования отрицательных ионов атомов и молекул металла, легированных полупроводником.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить вольт-амперные характеристики на границе перехода металл – германий и металл – кремний при прямом приложенном напряжении;
- определить вольт-амперные характеристики на границе перехода металл – полупроводник при обратном приложенном напряжении.

Основная часть

Вольт-амперные характеристики германия и кремния на основе алюминия при прямом приложенном напряжении. Вольт-амперные характеристики германиевых и кремниевых диодов, приведенные на рис. 2, качественно объясняют на основе образования $p-n$ перехода. Произвести конкретный количественный расчет полученных зависимостей с теоретическим обоснованием оказалось достаточно сложной задачей. Возникла

необходимость в создании теории формирования вольт-амперных характеристик на строго обоснованной теоретической базе, развитой в работах [6–8]. В этой связи ионизация отрицательных ионов у анода или у катода позволяет определять величину тока проводимости.

Электроны тока проводимости внутри столбообразной пустоты на поверхности анода останавливаются и внутрь кристалла не проникают, так как не в состоянии преодолеть работу выхода кристалла алюминия 4,25 эВ [9]. Свободные электроны на поверхности кристалла алюминия создают электрическое поле, которое направлено нормально к поверхности кристалла. Под действием такого поля формируется ток смещения, в котором возникают колебания нормальной и тангенциальной составляющей напряженности электрического поля с равной амплитудой.

В стационарных условиях протекания тока проводимости в $p-n$ переходе при внешнем прямом приложенном напряжении колебания электрического тока проводимости не происходит, а поэтому током смещения можно пренебречь. При определении вольт-амперной характеристики электрический ток измеряется во внешней замкнутой цепи, в которой реализуется только ток смещения [5]. На этой основе разработано программное обеспечение и произведен расчет токов смещения в зависимости от приложенного прямого внешнего электрического напряжения с использованием исходных данных, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения радиусов атомов в кристалле, молекуле и свободных атомах, а также сродства к электрону и встроенного атомного электрического момента в атомах [9–11]

The values of the radii of atoms in a crystal, molecule, and free atoms, as well as of the electron affinity and of the built-in atomic electric moment in atoms [9–11]

Параметр	Осаждаемые частицы и основа		
	германий	кремний	алюминий
Радиус атома в кристалле, Å	1,390	1,180	1,430
Радиус свободного атома, Å	1,536	1,475	1,817
Радиус молекулы, Å	2,210	2,122	2,614
Сродство к электрону атомов, эВ	1,230	1,500 (1,380)	0,440
Дипольный электрический момент атома, Кл·м ·10 ³⁰	2,618	5,100	3,410
Величина заряда в центре молекулы, Кл·10 ²⁰	1,704	3,458	2,135

Результаты расчета вольт-амперной характеристики германиевого диода приведены на рис. 3. Теоретический расчет ВАХ в пределах порядка величины достаточно удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными, которые приведены на рис. 2а. Можно подобрать условия, когда произойдет полное совпадение с экспериментальной зависимостью.

Для германиевого диода с учетом взаимодействия электрона отрицательного иона с электрическими диполями атомов и молекул алюминия, а также молекул примеси в столбообразной пустоте и уменьшения температуры электронного газа вследствие преодоления контактной разности потенциалов металл – полупроводник на 40 К реализуется полное совпадение теоретической ВАХ с экспериментальной ВАХ. При температуре диода 75 °С совпадение теоретической и экспериментальной ВАХ возникает в условиях, приведенных на рис. 3, а в зоне контакта металл – полупроводник вследствие преодоления контактной разности потенциалов падение температуры электронного газа происходит внутри металла почти на 23 °С. Можно подобрать условия, когда произойдет полное совпадение с экспериментальной зависимостью. Если для германиевого диода учесть взаимодействия электронов отрицательных ионов с электрическими диполями атомов, формирующих внутреннюю поверхность столбообразной пустоты, то начиная с критического напряжения ($U \sim 0,364$ В) происходит резкое возрастание электрического тока диода.

Теоретический расчет ВАХ кремниевого диода выполнен в условиях, когда происходит взаимодействие электронов отрицательных ионов с электронным облаком кристалла алюминия при наличии двух слоев молекул примеси вокруг столбообразных пустот. Результаты расчета представлены на рис. 4. Полученные зависимости по своему виду полностью совпадают с экспериментальными ВАХ (рис. 2b).

Сравнивая связь свободного электрона с атомом кремния при критическом напряжении 0,8 В, обнаружим, что падение температуры электронного газа в контакте алюминий – кремний по сравнению с температурой диода 20 °С происходит не более чем на 1 °С. При температуре диода 125 °С такое возрастание температуры электронного газа в контакте алюминий – кремний составляет уже 165,5 °С. В этом случае теория позволяет определить критическое прямое напряжение, которое возникает в контакте ме-

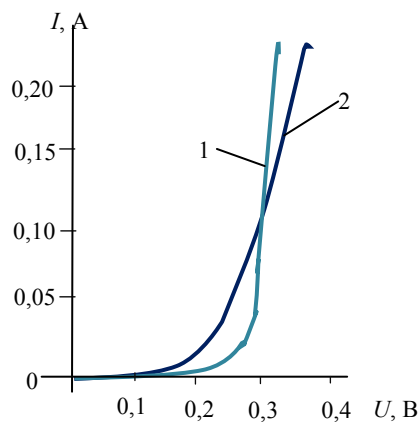


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика германиевого диода для активной площади диода 100×100 мкм² с напылением одного мономолекулярного слоя германия: 1 – $T = 20$ °С для критического нормального напряжения 0,364 В при температуре электронного газа 254 К; 2 – 75 °С для критического нормального напряжения 0,4 В при температуре электронного газа 325 К

Fig. 3. Volt-ampere characteristic of a germanium diode for an active diode area of 100×100 microns with a single monomolecular layer of germanium deposition: 1 – $T = 20$ °С for a critical normal voltage of 0.364 V at an electron gas temperature of 254 K; 2 – $T = 75$ °С for a critical normal voltage of 0.4 V at an electron gas temperature of 325 K

талл – полупроводник. В результате падение напряжения на контакте уменьшилось с 0,809 до 0,667 В. Падение напряжения 0,667 В на контакте алюминий – кремний было получено экспериментально (рис. 2b).

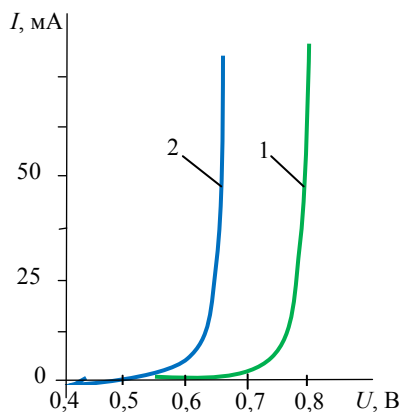


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевого диода для активной площади диода $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ с напылением одного мономолекулярного слоя примеси ($n=2$): 1 – при $T = 20 \text{ °C}$; 2 – 125 °C

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of a silicon diode for an active diode area of $100 \times 100 \text{ microns}$ with deposition of one monomolecular impurity layer ($n=2$): 1 – at $T = 20 \text{ °C}$; 2 – at $T = 125 \text{ °C}$

Вольт-амперные характеристики германия и кремния при обратном приложенном напряжении. При обратном приложенном напряжении контакты меняются на обратные. Катод превращается в анод, а анод – в катод. Электрический ток проводимости возникает только в столбообразной пустоте вследствие движения свободных электронов. Источником свободных электронов у анода являются отрицательные ионы примесей, а у катода – электроны внутри кристалла алюминия. Столбообразная пустота по распределению электрических зарядов трансформируется и представлена на рис. 5.

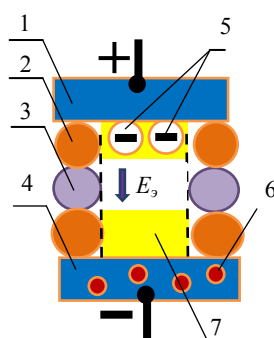


Рис. 5. Элемент столбообразной пустоты: 1 – анод; 2 – молекула алюминия; 3 – молекула примеси; 4 – катод; 5 – отрицательные ионы атомов примеси; 6 – электроны в кристалле алюминия; 7 – столбообразная пустота между катодом и анодом

Fig. 5. Columnar void element: 1 – anode; 2 – aluminum molecule; 3 – impurity molecule; 4 – cathode; 5 – negative ions of impurity atoms; 6 – electrons in an aluminum crystal; 7 – a columnar void between the cathode and the anode

При наложении обратного напряжения структура расположения атомов примеси и поверхность алюминия остались прежними. Изменилось только направление воздействия внешнего приложенного поля. В этом случае 9 атомов примеси в столбообразной пустоте расположены у анода. Эти атомы пребывают в виде заряженного слоя отрицательных ионов. Электрически заряженный слой из отрицательно заряженных ионов полупроводника под воздействием приложенного электрического поля и темпера-

туры ионизируется и поставляет в окружающую среду свободные электроны. Эти свободные электроны проникнуть в кристалл алюминия и создавать ток проводимости не могут, так как их энергия направленного движения не в состоянии преодолеть работу выхода электронов из кристалла алюминия, как это показано на рис. 5.

Связанные электроны внешнее электрическое поле не создают. Такое поле создают только свободные электроны. Однако электрическое поле, которое они формируют, проникает на глубину двойного электрического слоя с максимумом на поверхности кристалла и минимумом на слое положительных ионов внутри кристалла. Трехатомные молекулы в центре обладают электрическим зарядом разного знака в равных количествах [12, 13]. Величины этих зарядов приведены в табл. 1.

Поэтому в твердом теле трехатомные молекулы взаимодействуют парно. На рис. 6а это хорошо видно. Когда соприкасаются две отполированные металлические поверхности, включается взаимодействие трехатомных молекул разных электрических знаков. Если такой контакт поместить во внешнее электрическое поле, то возникнет поляризация и произойдет разделение зарядов разных знаков. В этом случае взаимодействие трехатомных молекул заметно ослабится.

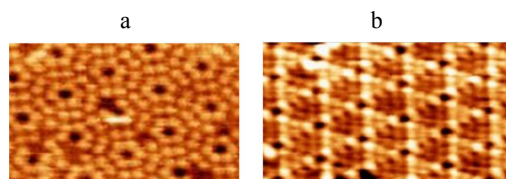


Рис. 6. Деформация поверхности кремния (111) под действием внешнего электрического поля при разных напряжениях на образце: а – $U_s = +2,0$ В; б – $U_s = -2,0$ В [20]

Fig. 6. Deformation of the silicon surface (111) under the influence of an external electric field at different voltages on the sample: а – $U_s = +2.0$ V; б – $U_s = -2.0$ V [20]

Туннельным микроскопом установлено [14, 15], что при подаваемом напряжении ~ 2 В происходит разделение зарядов трехатомных молекул разных знаков вокруг столбообразных пустот. Экспериментально это хорошо видно на рис. 6. На рис. 6а трехатомные молекулы кремния с положительным зарядом в центре внешним полем вдавливаются внутрь твердого тела, а с отрицательным зарядом в центре приложенное внешнее поле не в состоянии преодолеть энергию связи таких молекул с положительным остовом основного кристалла. Поэтому деформация поверхности отсутствует. При отрицательном напряжении положительно заряженные молекулы на поверхности кремния вытягиваются с поверхности, так как они с остовом кристалла связаны незначительно [16, 17]. Это хорошо видно на рис. 6б. В случае контакта двух плоскостей из трехатомных молекул внешнее приложенное напряжение будет смещать эти поверхности друг относительно друга. Такое смещение на основании рис. 5 определяется следующим образом:

$$\Delta r = \frac{2W}{eE_3}, \quad (2)$$

$$\text{где } W = W_0 \left(1 - \frac{eE_3 r_{a,b}}{\epsilon_r W_0} \right) \exp \left[-\frac{W_0 \left(1 - \frac{eE_3 r_{a,b}}{\epsilon_r W_0} \right)}{k_b T_e} \right], \quad W_0 - \text{начальная энергия}$$

связи трехатомных молекул в контакте и определяется кулоновским, электрон-дипольным и диполь-дипольным взаимодействием молекул при их контакте; E_3 – внешняя напряженность электрического поля; T_e – температура электронного газа после прохождения p – n перехода; $r_{a,b}$ – расстояние между центрами контактирующих молекул. Для взаимодействия трехатомных молекул относительная диэлектрическая проницаемость вокруг столбообразной пустоты

$$\epsilon_r = \frac{3^2 n_{Al} p_{3,1} p_{3,2}}{3 \epsilon_0 k_b T}. \quad (3)$$

Используя данные табл. 1, при контакте молекул алюминия и германия $W_0 = 0,0832$ эВ, при контакте алюминия и кремния $W_0 = 0,172$ эВ, при контакте кремния с кремнием $W_0 = 0,381$ эВ. Относительная диэлектрическая проницаемость контакта алюминий – германий $\epsilon_r = 7,67$. Для контакта алюминий – кремний $\epsilon_r = 14,7$, для контакта кремний – кремний $\epsilon_r = 29,5$. Падение напряжения последовательно на этих контактах составит: 0,806, 1,67 и 3,69 В. Следовательно, внутренняя поверхность столбообразных пустот является хорошим диэлектриком, по которому могут распространяться электромагнитные волны и создавать ток смещения.

Для германиевого диода это два контакта металл – полупроводник, а для кремниевого диода три контакта: два металл – полупроводник и один полупроводник – полупроводник. В результате для кремниевого диода подаваемые обратные напряжения должны быть больше, чем для германиевого, что было установлено экспериментально (рис. 2). При температуре 20 °С подаваемые обратные напряжения для кремниевого диода почти в два раза больше, чем для германиевого.

При обратном приложенном электрическом напряжении свободные электрические заряды в столбообразной пустоте возникают у поверхности анода и катода. Непосредственно с поверхности кристалла алюминия у катода под действием приложенного внешнего поля и температуры диода могут возникать свободные электроны вследствие преодоления работы выхода и создавать ток проводимости внутри столбообразной пустоты. У анода свободные электроны возникают вследствие ионизации отрицательных ионов также под действием температуры и приложенного электрического поля. Однако движение этих электронов не происходит, но их поверхностная концентрация создает электрическое поле, которое пронизывает двойной электрический слой, образованный на поверхности кристалла алюминия в столбообразной пустоте.

Возникновение тангенциальной составляющей электрического поля в двойном электрическом слое кристалла алюминия приводит к формированию тока смещения. Преодоление двойного электрического слоя свободными электронами между отрицательными ионами примесей и двойным электрическим слоем кристалла алюминия не происходит, так как их энергия значительно меньше работы выхода кристалла алюминия.

При обратном напряжении у катода свободные электроны возникают вследствие термоавтоэлектронной эмиссии с преодолением работы выхода электронов из кристалла алюминия. В результате у катода формируется ток проводимости. При этом свободные электроны преодолевают энергию работы выхода, которая для поликристалла алюминия равна 4,25 эВ [9]. Контакт молекул германия и кремния возникает с кристаллом алюминия только в столбообразных пустотах. Наложение обратного внешнего электрического поля приводит к возникновению тока проводимости у катода с учетом того, что образование свободных электронов для германия происходит вследствие преодоления энергии выхода электрона из металла алюминия. Как для германия, так и для кремния общая энергия, которую должен преодолеть электрон, составит

$$W = 4,25 + 1,687 = 5,937 \text{ эВ.} \quad (4)$$

Чтобы такую энергию реализовать на контакте металл – полупроводник, необходимо подать между катодом и анодом напряжение значительно большей величины. Во сколько раз необходимо увеличить внешнее напряжение по сравнению с необходимым для преодоления внутренних энергетических связей, определяется величиной

$$N = \frac{k_1 (d_{Al} + \Delta d_1) + k_2 (d_p + \Delta d_2)}{r_a}, \quad (5)$$

где k_1 и k_2 – соответственно число слоев молекул алюминия и молекул примеси, формирующих столбообразную пустоту; d_{Al} и d_p – диаметры молекул алюминия и примеси; Δd_1 и Δd_2 – температурное расширение между взаимодействующими молекулами вокруг столбообразной пустоты. Кроме этого, необходимо учитывать вероятность несовпадения столбообразных пустот анода и катода, а также то, что свободные электроны в контакте металл – полупроводник вследствие ионизации отрицательных ионов могут накапливаться и создавать отрицательно заряженную плоскость, которую электронам проводимости необходимо преодолевать. Все эти три процесса определяют, во сколько раз необходимо увеличивать подаваемое напряжение, чтобы происходила эффективная ионизация отрицательных ионов.

Энергетические схемы при напылении германия или кремния на поверхность алюминия с обратным приложенным напряжением показаны на рис. 7. Рис. 7 отличается от рис. 5 тем, что на рис. 5 показана конструкция расположения атомов, а на рис. 7 – схемы расположения энергий ионизации отрицательных ионов атомов примеси относительно энергетической структуры кристалла алюминия.

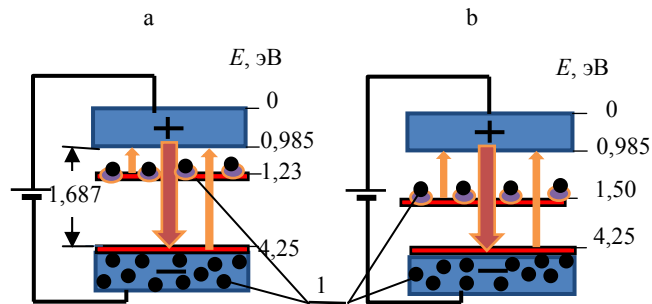


Рис. 7. Энергетическая схема в столбообразной пустоте при напылении на поверхность алюминия (111): а – германия; б – кремния; 1 – связанные электроны

Fig. 7. Energy pattern in a columnar void when aluminum (111) is sprayed onto the surface of: a – germanium; b – silicon; 1 – bound electrons

Из рис. 7 следует, что в диоде с контактом металл – полупроводник реализуются две области, из которых возможна эмиссия свободных электронов. Это ионизация отрицательных ионов у анода и эмиссия свободных электронов из металла с учетом распределения по энергиям Ферми – Дирака [17].

На основании рис. 7 результирующая энергия, которую связанный электрон должен преодолеть, чтобы стать свободным, в замкнутой электрической цепи у анода для германиевого диода $\Delta E_{g,i} = 1,23$ эВ, а для кремниевое диода $\Delta E_{g,i} = 1,50$ эВ. Приведенные значения есть энергии сродства атомов примеси. Область энергий до границы зоны проводимости кристалла алюминия изменяется под действием температуры и приложенного электрического поля, а в области энергий от смещенной границы зоны проводимости алюминия и до нуля воздействует только температура.

Свободные и связанные электроны на поверхности алюминия у анода находятся в динамическом равновесии, но при этом возникают колебания электрического поля, создаваемого свободными электронами. На поверхности металла совершаются колебания электрического поля с частотой, которая определена при распространении постоянного электрического поля. Для каждого кристалла эта величина постоянная и определяется его структурой. Возникновение тангенциальной составляющей электрического поля на поверхности кристалла алюминия в двойном электрическом слое приводит к возникновению во внешней электрической цепи электрического тока смещения.

Амплитуда падения напряженности электрического поля на поверхности кристалла у анода составит [18]

$$E_{\alpha,0} = \frac{\Delta\phi_k}{r_g}, \quad (6)$$

где r_g – радиус атома германия или кремния; $\Delta\phi_k$ – приложенное внешнее напряжение для преодоления энергии между отрицательным ионом и дном

зоны проводимости алюминия, равной для германия 2,019 В, а для кремния 5,528 В. При этих значениях для обратного внешнего приложенного электрического поля возникает ионизация отрицательных ионов у анода. Образующиеся свободные электроны у анода вследствие ионизации отрицательных ионов германия не могут преодолеть работу выхода кристалла алюминия и поэтому накапливаются на поверхности металла алюминия и создают тангенциальное электрическое поле. В результате внутри металла алюминия возникает электрический ток смещения, распространяющийся по поверхности подводящих проводов.

В кремниевом диоде ионизация отрицательных ионов кремния поставляет внутрь столбообразной пустоты свободные электроны с энергией, которая больше работы выхода электронов из металла алюминия. Такие электроны проникают внутрь металла, там остаются и не создают тока смещения. Поэтому в кремниевом диоде ток смещения возникает вследствие преодоления работы выхода из алюминия только из катода, а образующиеся свободные электроны вследствие ионизации отрицательных ионов кремния у анода поглощаются кристаллом алюминия и создают электрическое поле, которое ослабляет внешнее приложенное электрическое поле.

В германиевом диоде анод участвует в формировании электрического тока смещения, для которого

$$\Delta\varphi_k = 2,019 \frac{r_z}{d_k} = 2,168 \text{ В}, \quad (7)$$

где d_k – толщина двойного электрического слоя в аноде, равная радиусу атома в кристалле алюминия, значение которого приведено в табл. 1, а для кремния $\Delta\varphi_k = 5,625$ В. Это энергии свободных электронов, которые образуются вследствие ионизации отрицательных ионов германия и кремния. В случае германиевого диода энергии образующихся при ионизации отрицательных ионов недостаточно для преодоления работы выхода электронов из кристалла алюминия, и поэтому они на поверхности кристалла создают отрицательно заряженную плоскость, которая определяет ток смещения.

В кремниевом диоде образующиеся свободные электроны обладают энергией большей, чем работа выхода электронов из кристалла алюминия. При этом кристалл алюминия поглощает образующиеся электроны при ионизации отрицательных ионов кремния. В результате реализуется тангенциальное электрическое поле на границе металла – алюминия у анода, которое не формирует тока смещения, а создает электрическое поле внутри столбообразной пустоты, которое препятствует движению электронов тока проводимости от катода к аноду.

Передаваемый поток мощности электрическим током смещения определяется вектором Умова – Пойнтинга, который в данном случае определяется следующим образом [5]:

$$P = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_i^2. \quad (8)$$

Поверхностная концентрация свободных электронов вследствие ионизации отрицательных ионов у анода в столбообразной пустоте [18]

$$E_i = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \quad (9)$$

На основании рис. 7 поверхностная плотность электрических зарядов равна

$$\sigma = \frac{eN_a w}{\pi d_{Ge}^2}. \quad (10)$$

Здесь $N_a = 3 + 6(1 - \theta)$ – полное количество атомов примеси в столбообразной пустоте; w – вероятность ионизации отрицательных ионов атомов примеси, которая равна

$$W = \left(1 - \frac{\Delta\varphi}{E_{A,Ge}}\right) \exp\left[-\frac{E_{a,Ge}}{k_b T_e} \left(1 - \frac{\Delta\varphi}{E_{A,Ge}}\right)\right]. \quad (11)$$

В этом уравнении T_e является температурой электронного газа после прохождения p – n перехода.

Окончательно ток смещения

$$I_{bias} = \frac{PS_e}{\Delta\varphi}. \quad (12)$$

Здесь $\Delta\varphi = 2E_{\varepsilon,a}r_a$ – разность потенциалов, которая наводится на атомах примеси; S_e – общая площадь соприкосновения атомов примеси с кристаллом алюминия в столбообразных пустотах.

Электрический ток проводимости возникает только в столбообразных пустотах. Размер площади столбообразной пустоты для кристалла алюминия на основании рис. 5 и 7 с учетом разных радиусов молекул кремния и алюминия (табл. 1) $S_{Al} = 1,234 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$. Площадь столбообразной пустоты совместно с молекулярным окружением $S_0 = 6,048 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$. Полная площадь соприкосновения $S_{e,1}$ при точечной технологии изготовления диодов находится по значению электроемкости

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_{e,1}}{d}.$$

Отсюда для столбообразной пустоты $\varepsilon_r = 1$, и тогда

$$S_{e,1} = \frac{C d}{\varepsilon_0}. \quad (13)$$

В формуле (13) размер величины d равен толщине двойного электрического слоя кристалла алюминия. Все величины в (13) определены, и площадь для емкости $C = 1 \cdot 10^{-12}$ Ф имеет значение $S_{e,1} \cong 1,617 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Для кремниевого диода ток смещения вследствие ионизации отрицательных ионов кремния отсутствует. Возникает только электрический ток проводимости в столбообразных пустотах у катода. Кроме этого, следует учитывать, что при производстве кремниевых диодов применяется не точечная, а плоскостная сплавная технология, в которой электрическая емкость p – n перехода реализуется на порядок более, чем для точечной технологии. Тогда для плоского конденсатора емкостью 10 нФ общая площадь составит $S_{e,1} \cong 1,617 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Свободные электроны тока проводимости у анода тормозятся и создают переменное электрическое поле внутри кристалла алюминия. При этом происходит превращение электрического тока проводимости в ток смещения.

Окончательно общая площадь соприкосновения атомов примеси с кристаллом алюминия в столбообразных пустотах составит

$$S_e = \frac{S_{e,1}}{S_0} S_{Al}. \quad (14)$$

При выполнении расчетов ВАХ необходимо учитывать, что температура электронного газа при прохождении p – n перехода отлична от температуры корпуса диода. Она должна уменьшаться при прямом приложенном напряжении, и достаточно существенно. В этой связи проведем анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 2а для германия, которые даны в табл. 2. В табл. 2 приведены данные электрических токов проводимости и смещения, экспериментально полученные и теоретически рассчитанные при разных температурах диода. Кроме этого, указаны значения уменьшения температуры электронного газа, при которых теоретический расчет совпадает с данными, полученными опытным путем.

Таблица 2

Токи смещения и проводимости в зависимости от температуры германиевого диода

Displacement and conduction currents depending on the temperature of the germanium diode

Параметр	Температура, °C				
	–60	+20	+50	+60	+75
I , мА, экспер.	0,043	0,100	0,22	0,56	1,32
I , мА, теор.	$1,015 \cdot 10^{-4}$	0,124	0,489	14,37	63,82
ΔT , °C	+13,47	–0,82	–25,14	–31,94	–36,20
I , мА, результ.	0,100	0,26	0,44	0,74	1,24
I , мА, провод.	0,057	0,144	0,22	0,18	–0,08

У катода величина плотности тока смещения, сформированная у анода в замкнутой цепи, проходит без изменения, но у границы катода под действием приложенного внешнего напряжения и температуры дополнительно возникает ток проводимости. При этом на выходе из катода внутри столбообразной пустоты плотность электрического тока проводимости определяется термоавтоэлектронной эмиссией по формуле [1, 19]

$$J_{con} = a \frac{2e}{d_{Al}^3} \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \left(1 - \frac{W_p - \Delta W}{W_p} \right) \exp\left(\frac{W_p - \Delta W}{k_b T_e}\right) \exp\left(\frac{e0.987}{k_b T_e}\right). \quad (15)$$

Здесь $W_p = 4,25$ эВ; $\Delta W = eE_{\gamma,0}d_k$; d_k – толщина двойного электрического слоя, равная радиусу атома внутри кристалла алюминия (табл. 1).

Электрический ток проводимости определяется следующим образом:

$$I_{con} = J_{con} S_{eff}. \quad (16)$$

По формуле (16) определяется плотность тока проводимости внутри столбообразной пустоты. Поэтому у анода для германиевого диода дополнительно к току смещения добавляется ток проводимости. В стационарных условиях результирующий электрический ток в соответствии с законом полного тока равен сумме

$$I_{res} = I_{bias} + I_{con}. \quad (17)$$

В стационарных условиях увеличение тока смещения током проводимости компенсируется потерями результирующего тока смещения во внешней электрической цепи на основании закона Джоуля – Ленца.

Получается, что результирующий электрический ток при обратном приложенном напряжении в германиевом диоде определяется термоавтоэлектронной эмиссией как у анода, так и у катода. У катода возникает электронное облако, которое своим действием препятствует эмиссии электронов из катода, которое трудно учесть. Поэтому для германиевого диода ток проводимости был определен как разность результирующего электрического тока и тока смещения, полученного теоретически. У катода электрический ток проводимости переходит в ток смещения у анода. Так как на границе кристалла алюминия ток проводимости полностью переходит в ток смещения, на поверхности кристалла не накапливаются электроны у анода и не создают дополнительного электрического поля, которое должно уменьшать поток движения электронов от катода к аноду².

В кремниевом диоде электрический ток формируется только у катода, создавая ток проводимости, а у анода ток проводимости превращается в ток смещения. Электроны, которые образуются у анода при ионизации отрицательных ионов кремния, проникают внутрь кристалла алюминия и на его поверхности возникает избыток электронов. Образующаяся заря-

² Ток смещения в этом случае представляет ТМ-волну, т. е. электрическую волну, которая распространяется в столбообразной пустоте, как по волноводу с диэлектрическими стенками.

женная плоскость создает электрическое поле, препятствующее движению электронов в столбообразной пустоте от катода к аноду.

По формулам (6)–(9) определяется напряженность электрического поля. Получены конкретные значения: при температуре 20 °С это $2,677 \cdot 10^7$ В/м, а при температуре 125 °С это $1,790 \cdot 10^8$ В/м. В вакууме такие значения напряженности электрического поля вполне допустимы.

Свободный электрон преодолевает энергию при движении от катода к аноду, равную

$$W_{Si} = eE_a h_s, \quad (18)$$

где E_a – напряженность электрического поля, создаваемая приложенным внешним обратным напряжением; $h_s = 2d_{Al} + 2d_{Si} + r_{Al}$.

В результате получаем $W_{Si} = 0,0292$ и $0,195$ эВ соответственно при температуре 20 и 125 °С.

Конкретный расчет напряжения, которое электрон преодолевает при движении от катода к аноду с учетом всех трех процессов, рассмотренных выше, при достаточно грубом определении вероятности стыковки столбообразных пустот катода и анода, для температуры 20 °С составило ~726 В, а для температуры 125 °С это ~806 В. Из вольт-амперных характеристик (рис. 2) эти значения примерно равны ~777 и ~889 В. Для германиевого диода с ростом температуры приложенное обратное внешнее напряжение уменьшается, а для кремниевого диода, наоборот, возрастает. Это подтверждается экспериментом (рис. 2). Получается, что для кремниевого диода ток смещения вследствие ионизации отрицательных ионов кремния отсутствует. Возникает только электрический ток проводимости в столбообразных пустотах у катода. Свободные электроны тока проводимости у анода тормозятся и создают переменное электрическое поле внутри кристалла алюминия. При этом происходит превращение электрического тока проводимости в ток смещения.

Плотность тока проводимости определяется по формуле (1), в которой уменьшение работы выхода из кристалла алюминия определяется своим значением напряженности электрического поля внутри столбообразной пустоты. При обратном приложенном напряжении с учетом возрастания напряженности электрического поля, формируемого у анода, получим

$$\Delta W = eE_{\gamma,0} r_{Al} + W_{Si}, \quad (19)$$

где $d_k = 2d_{Al} + 2d_{Si}$ и $E_{\gamma,0} = \frac{\Delta U}{dk}$. Здесь ΔU соответственно равно 777 и 889 В при температурах 20 и 125 °С.

Применение формулы (14) возможно до границы смещения энергии электронов внутри кристалла алюминия, которая удалена относительно нулевого значения на величину 0,987 эВ. В случае германиевого диода до энергий $W_p = 3,2922$ эВ реализуется термоавтоэлектронная эмиссия, а с энергий 1,0162 эВ возникает только термоэлектронная эмиссия, которая возрастает по экспоненте в зависимости от приложенного напряжения. Для кремниевого диода эти энергии соответственно равны 3,468 и 1,182 эВ.

Измерение электрического тока производится во внешней цепи, по про-
водам которой может протекать только ток смещения. Внутри столбооб-

разной пустоты кремниевого диода формируется только ток проводимости. На поверхности анода происходит превращение тока проводимости в ток смещения. В этой связи важно выяснить, как это происходит.

Внешнее электрическое поле создают только свободные электроны. У анода кремниевого диода свободные электроны возникают только вследствие ионизации отрицательных ионов. Энергия ионизации отрицательных ионов кремния у анода составит $\delta\varphi = 0,987 + 0,195 - 1,5 = 0,318$ эВ. При ионизации отрицательных ионов с энергией 0,318 эВ будут возникать электроны с энергией 3,08 эВ. Такие электроны внутри кристалла алюминия проникать не в состоянии. В этих условиях ионизация атомов кремния на поверхности кристалла алюминия обеспечит превращение тока проводимости в ток смещения в контакте алюминий – кремний, и по внешней электрической цепи возникнет электрический ток смещения

$$J_{con} = a \frac{2e}{d_{Al}^3} \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{e0,318}{k_b T_e}\right) \frac{S_{e,1} S_{Al}}{S_0}. \quad (20)$$

На основании (20) электрический ток кремниевого диода соответственно при температуре 20 и 125 °С. составит $3,27 \cdot 10^{-5}$ и $1,15 \cdot 10^{-5}$ А. Из рис. 2 эти токи равны $3,75 \cdot 10^{-5}$ и $5,00 \cdot 10^{-5}$ А. Совпадение теоретических расчетов с экспериментом достаточно убедительное. Подгонки, которые неизбежно использовались, были вполне оправданы.

Таким образом, рассмотренная модель работы диодов на контакте металл – полупроводник достаточно сложная и запутанная. В отсутствие надежных экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, предвидеть разработанную модель функционирования диода на контакте металл – полупроводник просто исключено.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ функционирования диодов и стабилитронов на основе контакта алюминий – германий и алюминий – кремний позволил установить следующее.

1. При прямом приложенном внешнем напряжении общим для вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов является:

- преодоление величины энергии сродства отрицательных ионов атомов примеси у катода с возникновением тока проводимости внутри столбообразной пустоты;
- протекание электрического тока смещения по внутренней стенке столбообразной пустоты от анода к катоду;
- превращение тока проводимости в ток смещения у анода;
- увеличение изменения энергии сродства в процессе взаимодействия отрицательного иона с дипольными электрическими моментами атомов, формирующих внутренние стенки столбообразной пустоты;
- уменьшение температуры электронного газа в процессе преодоления контактной разности потенциалов p – n перехода.

2. При обратном приложенном напряжении общим для вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов является следующее:

- ионизация отрицательных ионов у анода с превращением в ток смещения;
- термоавтоэлектронная эмиссия электронов с кристалла алюминия внутри столбообразной пустоты у катода с формированием тока проводимости внутри столбообразной пустоты и тока смещения по боковым стенкам столбообразной пустоты;
- увеличение изменения энергии сродства в процессе взаимодействия отрицательного иона с дипольными электрическими моментами атомов, формирующих внутренние стенки столбообразной пустоты;
- повышение температуры электронного газа в процессе прохождения контактной разности потенциалов p – n перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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>
2. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Л.: 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. Зеневич. Минск: Белорус. гос. академия связи, 2017. 227 с.
5. Гречихин, Л. И. Удельное электрическое сопротивление при токах проводимости и токах смещения / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2023. № 9. С. 10–21.
6. Gretchikhin, L. I. Formation of p -, n -Conductivity in Semiconductors / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2018. Vol. 66, No 3. P. 304–321.
7. 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.
8. Гречихин, Л. И. Формирование p - и n -проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2023. № 6. С. 8–16.
9. 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.
10. Радциг, А. А. Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
11. Gretchikhin, L. Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules / L. Gretchikhin // Авиационный вестник. 2020. No 2. P. 28–34.
12. Гречихин, Л. И. Аллотропия в металлах и ее влияние на работу теплового двигателя / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. Донецьк: ДонНТУ. 2011. Вип. 42. С. 83–89.
13. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // Авиационный вестник. 2021. № 5. С. 21–28.
14. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк, Г. Ф. Лепин [и др.]. Берлин: Lambert. Academic Publishing, 2015. 80 с.
15. Binning, G. Scanning Tunneling Microscopy / G. Binning, H. Rohrer // Helv. Phys. Acta. 1982. Vol. 55, No 6. P. 726–735.
16. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности / Л. И. Гречихин, С. Д. Латушкина, В. М. Комаровская [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015, № 9. С. 5–10.
17. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.

18. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 302 с.
19. Эмиссионный портрет поверхности упрочняющего конструкционного материала / Ю. Шмермбекк, Д. Б. Мигас, А. И. Гутковский [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. № 3. С. 136–143.

Поступила 14.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. 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>.
2. Zherebtsov I. P. (1990) *Fundamentals of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
3. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Al'yans Publ. 496 (in Russian).
4. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. (2017) *Physical Foundations of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications. 227 (in Russian).
5. Gretchikhin L. (2023) Specific Electrical Resistance at Conduction Currents and Displacement Currents. *The Aviation Herald*, (9), 10–21 (in Russian).
6. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p -, n -Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički glasnik = Military Technical Courier*, 66 (3), 304–321.
7. 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).
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. Babichev A. I., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V. (1991) *Physical Quantities: A Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
10. Radtsig A. A., Smirnov B. M. (1980) *Handbook of Atomic and Molecular Physics*. Moscow, Atomizdat Publ. 240 (in Russian).
11. Gretchikhin L. (2020) Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules. *The Aviation Herald*, (2), 28–34 (in Russian).
12. Gretchikhin L. I., Kuts' N. G. (2011) Allotropy in Metals and its Influence on the Operation of a Heat Engine. *Progresivni tehnologii i sistemi mashinobuduvannya: Mizhnarodnii zbirnik naukovikh prats' [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: An International Collection of Scientific Papers]*. Donetsk, DonNTU, Issue 42, 83–89 (in Russian).
13. Gretchikhin L., Shmermbekk J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (in Russian).
14. Gretchikhin L. I., Shmermbekk Yu. (2015) *Study of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin, Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
15. Binnig G., Rohrer H. (1982) Scanning Tunneling Microscopy. *Helvetica Physica Acta*, 55 (6), 726–735.
16. Gretchikhin L. I., Latushkina S. D., Komarovskaya V. M., Shmermbekk Yu. (2015) The Cluster Structure of Silicon and its Surface Construction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (9), 5–10 (in Russian).
17. Gretchikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Technoprint Publ. 399 (in Russian).
18. Gretchikhin L. I. (2008) *Physics. Electricity and Magnetism. Modern Electrodynamics*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 302 (in Russian).
19. Shmermbekk Yu., Migas D. B., Gutkovsky A. I., Gretchikhin L. I. (2020) Emission Portrait of Surface of Reinforcing Structural Material. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (3), 136–143 (in Russian).

Received: 14 January 2025

Accepted: 18 March 2025

Published online: 31 July 2025