

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-218-234>

УДК 53(075.3)

Роль отрицательных ионов в светодиодах

Л. И. Гречихин¹⁾

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

Реферат. В светодиодах в качестве основы используется полупроводниковый кристалл с поверхностью в индексах Миллера (111), формируемый двухатомными молекулами арсенида галлия или фосфида индия объемными кластерами. Внутри них возникает структура из положительно заряженных ионов атомов галлия и мышьяка в арсениде галлия и обменного взаимодействия между положительно заряженными ионами атомов индия и фосфора в фосфиде индия. Положительно заряженный остов компенсируется облаком электронов. В светодиодах возникает электрический ток проводимости и смещения. Поверхность кристалла покрыта монослоем двухатомных молекул с образованием пустот квадратной формы, в которых могут разместиться одиночные примеси (до четырех разных атомов) с образованием отрицательных ионов. В качестве катода используется кристалл арсенида галлия или фосфида индия с примесью, а в качестве анода – алюминий. Ионизация отрицательных ионов разных примесей происходит под воздействием температуры и приложенного внешнего электрического поля. После ионизации возникают свободные электроны, которые в столбообразной пустоте формируют электрический ток проводимости, определяющий мощность светоизлучения. Размер светоизлучающей поверхности светодиода $\sim 10 \times 10$ нм. В зоне контакта анода и катода происходит частичное рассеяние электронного потока электрического тока проводимости, что заметно уменьшает мощность светоизлучения. Оно обусловлено энергетическим переходом свободного электрона с верхнего энергетического уровня на нижележащий уровень по схеме, как это происходит в атомах. Вольт-амперные характеристики для светодиодов определяются путем измерения электрического тока смещения во внешней цепи и напряжения на источнике тока. Эти данные не позволяют анализировать работу светодиода, так как светодиод работает на токе проводимости, который возникает внутри него. Какую долю он составляет от общего тока смещения, измеряемого во внешней цепи, трудно определить. В результате теоретического расчета оптимальный электрический ток проводимости в светодиоде не должен превышать 10 мА, а напряжение питания составляет от 1,3 до 3,5 В. Питание светодиода осуществляется только через балластное сопротивление с применением широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: светодиод, светоизлучение, ток проводимости, ток смещения, широтно-импульсная модуляция, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Роль отрицательных ионов в светодиодах / Л. И. Гречихин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 3. С. 218–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-218-234>

The Role of Negative Ions in LEDs

L. I. Gretchikhin¹⁾

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

Abstract. LEDs are based on a semiconductor crystal with a surface in Miller indices (111), formed by diatomic molecules of gallium arsenide or indium phosphide in bulk clusters.

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

A structure of positively charged ions of gallium and arsenic atoms in gallium arsenide and as well as of an exchange interaction between positively charged ions of indium atoms arises inside them. The positively charged skeleton is compensated by an electron cloud. An electric current of conduction and displacement occurs in LEDs. The crystal surface is covered with a monolayer of diatomic molecules with the formation of quadrate voids, which can accommodate single impurities (up to four different atoms) with the formation of negative ions. A crystal of gallium arsenide or indium phosphide with an admixture is used as the cathode, and aluminum is used as the anode. The ionization of negative ions of various impurities occurs under the influence of temperature and an applied external electric field. After ionization, free electrons arise which form an electric conduction current in the columnar void. An electric conduction current determines the power of light emission. The size of the light-emitting surface of the LED is $\sim 10 \times 10$ nm. In the contact zone of the anode and cathode, a partial scattering of the electron flow of the conduction current occurs, which significantly reduces the power of light emission. A scattering is caused by the energetic transition of a free electron from the upper energy level to the underlying level according to the scheme as it occurs in atoms. The volt-ampere characteristics for LEDs are determined by measuring the electric bias current in the external circuit and the voltage at the current source. These data do not allow us to analyze the operation of the LED, since the LED operates on the conduction current that occurs inside it. It is difficult to determine what proportion it makes up of the total displacement current measured in the external circuit. As a result of the theoretical calculation, the optimal electrical conduction current in the LED should not exceed 10 mA, while the supply voltage ranges from 1.3 to 3.5 V. The LED is powered only through ballast resistance using pulse width modulation.

Keywords: LED, light emission, conduction current, displacement current, pulse width modulation, volt-ampere characteristic

For citation: Gretchikhin L. I. (2026) The Role of Negative Ions in LEDs. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (3), 218–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-218-234>

Введение

Полупроводниковый светоизлучающий диод является значимым открытием XX в. В настоящее время достаточно эффективно светодиоды применяются во всех сферах человеческой деятельности. Полагали, что физическое обоснование работы такого вида техники возникает вследствие электролюминесценции на $p-n$ переходе [1], а в [2] рассматривали работу светодиода как проявление корпускулярно-волнового дуализма, который реализуется в фотоэффекте. В обеих теориях получали что-то близкое к эксперименту, но полностью обосновать реальный процесс, возникающий в светодиодах, понять достаточно сложно.

Если некоторые атомы (молекулы) в полупроводнике являются положительно заряженным (т. е. являются ионизованными), то такой полупроводник назван полупроводником p -типа (positiv), а если ряд атомов под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля ионизируются и поставляют свободные электроны в зону контакта, то такой полупроводник является полупроводником n -типа (negativ). Соприкосновение полупроводников n - и p -типа создают $p-n$ переход. Под действием приложенного внешнего электрического поля в зоне контакта возникает свечение, которое обусловлено движением навстречу свободных электро-

нов из *n*-полупроводника и положительно заряженных дырок из *p*-полупроводника. В зоне контакта происходит их рекомбинация с излучением света. На основе таких общих качественных представлений работа светодиодов оставалась неясной.

Энергия излучения отдельного фотона на основании формулы Планка составляет

$$h\nu = \Delta E, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота излучения; ΔE – разность энергий, которую преодолевает свободный электрон (равна произведению электрона на разность потенциалов ΔU). На основании формулы Планка свободный электрон, пройдя разность потенциалов 1,5 В, будет излучать фотон с длиной волны 827 нм, что соответствует инфракрасной области спектра. При прохождении электроном разности потенциалов 2 В будет излучаться фотон длиной волны 620 нм, что соответствует красной области спектра, а при разности потенциалов 3 В это будет уже 413 нм, что уже ближе к фиолетовой области спектра. Экспериментально эти значения при достаточно малых отклонениях полностью соответствуют экспериментальным данным. Однако остается неясным, каким образом возникают свободные электроны.

Основой светодиодов является полупроводниковый кристалл арсенида галлия (GaAs) или фосфида индия (InP). Полагали, что в кристалле арсенида галлия или фосфида индия, чтобы получить свободные электроны, необходимо преодолеть электрону энергию запрещенной зоны, которая для арсенида галлия равна $\approx 1,424$ эВ, а для фосфида индия $\approx 1,34$ эВ. В этом случае для ионизации атомов и молекул на поверхности полупроводниковой основы нужно сообщить им энергию несколько электронвольт. Вероятность преодоления электроном таких энергий при комнатной температуре близка к нулю, т. е. такое предположение просто не реализуется.

Внешние электрические поля на пространстве молекул или атомов настолько незначительные, что их воздействие на процесс ионизации атомов или молекул также можно не учитывать. Для обоснования возникающего свечения в работе [1] было предложено, что происходит явление электролюминесценции. В результате достаточно убедительно многие явления в светодиодах были объяснены. Однако электролюминесценция возникает на поверхности твердого тела, а излучение в светодиодах возникает в зоне контакта, а это не поверхность, а объем. Поэтому излучение в светодиодах стали рассматривать как самопроизвольный переход свободного электрона с одного уровня энергии на другой уровень с меньшим значением энергии в соответствии с основным законом природы, что все тела стремятся занять минимум потенциальной энергии. При этом интенсивность излучения определяется величиной концентрации возникающих свободных электронов.

В нормальных условиях при наличии слабых электрических полей эффективная ионизация атомов или молекул произойдет только в том случае, если энергия ионизации частиц будет меньше одного электронвольта. Частицами, у которых энергия связи внешних связанных электронов меньше одного электронвольта, могут быть только атомы, которые пребывают в виде отрицательных ионов. Каким образом формируются отрицательные ионы, рассмотрено в [3], а их влияние на электропроводимость в полупроводниках обосновано в работах [4, 5]. Влияние отрицательных ионов на работу полупроводниковых диодов изучено в [6, 7], на работу транзисторов – в [8, 9], на работу лазеров – в [10].

При рассмотрении физического механизма работы светодиодов следует уточнить структуру полупроводниковых кристаллов и их поверхностей арсенида галлия и фосфида индия, которые применяются в светодиодах в качестве основы. В светодиодах кристалл полупроводниковой основы легируется двухатомными молекулами, трех- и даже четырехатомными частицами. Необходимо выяснить, где и каким образом на поверхности полупроводниковой основы осаждаются двухатомные молекулы или трех- и четырехатомные частицы, а также, как эти молекулы и частицы взаимодействуют с кристаллом основы и почему они распадаются на атомы. Атомы на поверхности полупроводниковой основы вследствие обменного взаимодействия валентных электронов с электронами кристалла полупроводниковой основы самопроизвольно превращаются в отрицательные ионы.

Если ионизация отрицательных ионов возникает у катода вследствие воздействия температуры и приложенного внешнего электрического поля, то возникающие свободные электроны внешним приложенным электрическим полем начнут ускоренно двигаться к аноду. На аноде они резко тормозятся и возникает излучение электромагнитных волн у поверхности анода. Такое приложенное поле назвали прямым.

При обратном приложенном напряжении ионизация отрицательных ионов происходит на аноде. Образующиеся свободные электроны от внешнего электрического поля энергию не приобретают, и излучения электромагнитных волн не возникает. Если рассматривать, что излучение в светодиодах возникает вследствие явления электролюминесценции легированных примесей, то в этом случае излучение возникает вследствие возбуждения связанных электронов, которое не зависит от направления приложенного напряжения.

Чтобы детально обосновать такой вид излучения, необходимо выяснить:

- как формируется полупроводниковый кристалл и его поверхность двухатомными молекулами из разных атомов;
- какими частицами следует заполнять столбообразные пустоты на поверхности полупроводниковой основы для получения максимальной светоотдачи;
- как произвести расчет вольт-амперных характеристик при заполнении столбообразных пустот двухатомными молекулами или трех- и даже четырехатомными частицами;

– оптимальные условия реализации разных светодиодов по их цвету и мощности излучения.

Рассмотрим последовательно поставленные задачи.

Полупроводниковая основа светодиодов

В качестве основы в светодиодах применяют преимущественно арсенид галлия или фосфид индия в твердом состоянии. Исходные данные для атомов арсенида галлия и фосфида индия приведены в табл. 1. Твердое тело на основании данных, полученных на туннельном микроскопе, последовательно формируется следующим образом: исходные атомы в арсениде галлия и в фосфиде индия вследствие взаимодействия образуют двухатомные молекулы. Затем двухатомные молекулы, взаимодействуя, создают плоские промежуточные кластеры. Промежуточные кластеры образуют основной кластер. Взаимодействия основных кластеров на поверхности твердого тела образуют поверхностные кластеры вдоль осей x , y , а внутри твердого тела создают кристалл путем химической связи между основными кластерами вдоль осей x , y и z . Последовательность формирования поверхности твердого тела двухатомными молекулами из разных атомов, полученная теоретически, показана на рис. 1. Такая последовательность была проверена путем анализа работы диода Ганна [11]. Впервые общий вид поверхностных кластеров, формируемых трехатомными молекулами из одинаковых атомов (кремний), был получен авторами туннельного микроскопа [12], а более тщательное изучение поверхности твердого тела, формируемого двух- и трехатомными молекулами из одинаковых атомов, выполнено в работе [13].

Таблица 1

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

The values of the radii of atoms in a crystal, in a molecule, and in free atoms, as well as of the electron affinity and the built-in atomic electric moment in atoms and molecules

Параметр	Осаждаемые частицы и основа				
	Галлий	Индий	Мышьяк	Фосфор	Алюминий
Радиус атома в кристалле r , Å	1,390	1,66	1,200	1,300	1,43
Радиус свободного атома r , Å	1,811	1,998	1,480	1,322	1,817
Радиус молекулы r , Å	2,210	3,336	3,226	4,199	2,614
Сродство к электрону атомов, эВ	0,300	0,300	0,810	0,746	0,440
Дипольный электрический момент атома, $\times 10^{30}$ Кл·м	2,618	1,331	2,980	2,086	3,41
Величина заряда в центре молекулы, $\times 10^{20}$ Кл	1,704	3,458	1,908	-0,666	2,135

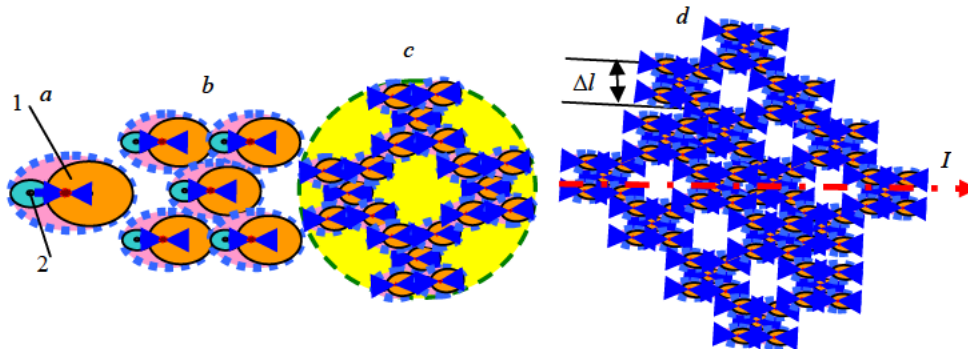


Рис. 1. а – двухатомная молекула из разных атомов (1 – атом галлия (индия), 2 – атом мышьяка (фосфора)); б – промежуточный кластер; с – основной кластер из двухатомных молекул разных атомов; д – структура поверхности из двухатомных молекул

Fig. 1. a – a diatomic molecule made of different atoms (1 – an atom of gallium (indium), 2 – an atom of arsenic (phosphorus)); b – an intermediate cluster; c – the main cluster of diatomic molecules of different atoms; d – the surface structure of diatomic molecules

В монографиях [14, 15] показано, что твердое тело внутри содержит кристалл, который создается объемными кластерами. Экспериментально установлено, что внутри твердое тело действительно формируется отдельными частицами (эктонами) [16], размеры которых совпадают с объемными кластерами. Результаты работы [16] следует рассматривать как экспериментальное подтверждение, что кристаллы в твердых телах формируются объемными кластерами.

Рентгеновские лучи рассеиваются на отдельных атомах. Поэтому рентгенокопия позволяет получать изображения того, как отдельные атомы расположены относительно друг друга внутри кристалла. Коллективное взаимодействие приводит к тому, что валентные электроны как бы обобщаются и располагаются между атомами. В результате получается, что атомы внутри кристалла пребывают в виде положительно заряженных ионов и создают кристаллическую решетку, а между атомами находятся валентные электроны в виде отрицательно заряженного облака.

Анализ поверхности твердых тел из молекул с разными атомами теоретически выполнен в [11]. В результате получено, что поверхность твердого тела содержит столбообразные пустоты квадратной формы. Расстояние для арсенида галлия, показанное на рис. 1, составляет $\Delta l = 5,29 \cdot 10^{-10}$ м, а для фосфида индия $\Delta l = 5,47 \cdot 10^{-10}$ м. Из рис. 1 следует, что площадь, которую занимает столбообразная пустота на поверхности твердого тела арсенида галлия или фосфида индия, соответственно равна $2,8 \cdot 10^{-19}$ и $3,0 \cdot 10^{-19}$ м². Такие размеры позволяют разместиться в них двум молекулам вида $A^{111}B^V$ таблицы Менделеева, которые используются в светодиодах и полупроводниковых лазерах. Из рис. 1 также получаем, что площадь, занимаемая отдельной столбообразной пустотой на поверхности полупроводниковой основы светодиода, примерно в 4,7 раза больше.

В качестве основы в диодах и транзисторах используются кристаллы размером не более 100×100 мкм². В светодиоде на таких расстояниях генерируемое излучение будет интенсивно рассеиваться преимущественно на дефектах кристаллической структуры, что приведет к интенсивному разогреву светодиода, а в конечном итоге к выходу его из строя. Поэтому основа светодиода должна быть на порядок и более меньше, т. е. $\sim 10 \times 10$ нм². Чтобы получить экспериментальные данные по светимости светодиода на основе примеси арсенида галлия, площадь его основы оказалась равной $11,4 \times 11,4$ нм². Практически это просто точка. Поэтому эта площадь основы светодиода была использована при расчетах потребляемой мощности для других примесей.

В процессе легирования внутри столбообразных пустот могут разместиться до двух двухатомных молекул арсенида галлия или фосфида индия. Однако в работе [6] было убедительно показано, что в процессе легирования в столбообразные пустоты проникает только одна молекула. Следовательно, в столбообразные пустоты может осаждаться только одна двухатомная молекула или одна частица из трех или четырех атомов. Если размещается на поверхности основы светодиода одна двухатомная молекула, одна трехатомная или одна четырехатомная частица из разных атомов третьей и пятой групп таблицы Менделеева, то общая поверхностная концентрация для каждого из атомов примеси примерно составит для основы из арсенида галлия $n_s \approx 3,57 \cdot 10^{18}$ 1/м², а для основы фосфида индия $n_s \approx 3,33 \cdot 10^{18}$ 1/м². При наложении электрического поля на светодиод внутри столбообразных пустот и на их границах у катода и анода могут возникать, по Максвеллу, только два вида электрических токов: ток проводимости и ток смещения. Других видов электрических токов в природе не существует.

Ток проводимости определяется движением свободных электрических зарядов и определяется следующим образом:

$$I = en_e v_e s, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация свободных электронов; v_e – скорость движения электронов; s – сечение потока свободных электронов со всей полупроводниковой основы.

Ток смещения возникает вследствие изменения величины электрического поля. Эйхенвальдом установлено, что вокруг изменяющегося электрического поля возникает вихревое магнитное поле, а это электромагнитная волна, которая переносит энергию вектором Умова–Пойнтинга, и осуществляется этот перенос энергии только по диэлектрику. По металлу электромагнитные волны не распространяются, а полностью отражаются. Это известный экспериментальный факт.

Чтобы понять, в каких условиях возникает тот или иной вид электрического тока и как эти токи взаимосвязаны, необходимо обосновать электронную структуру твердого тела.

Электронная структура твердого тела содержит три области: зону проводимости, запрещенную зону и валентную зону. Все три зоны в твердом теле, если оно сформировано атомами, определены в работах [14, 15]. Когда твердое тело формируется молекулами, то границы каждой зоны находятся путем теоретического расчета с применением зонной теории. Тогда электронная структура твердого тела из молекул арсенида галлия и фосфида индия с поверхностью в индексах Миллера [111] имеет вид, приведенный на рис. 2.

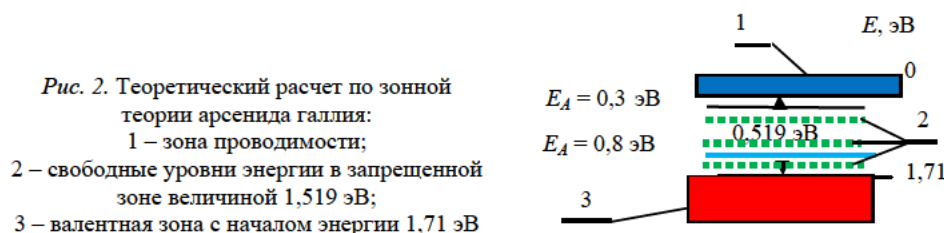


Fig. 2. Theoretical calculation based on the band theory of gallium arsenide:
1 – conduction band; 2 – free energy levels in the band gap of 1.519 eV;
3 – valence band with an energy start of 1.71 eV

Из рис. 2 следует, что смещение энергии ионизации молекул основы арсенида галлия составляет $\delta E = (1,710 - 1,519) \sim 0,19$ эВ. Это значение энергии определяет ширину зоны проводимости полупроводниковой основы арсенида галлия. Аналогичная ситуация реализуется и для фосфида индия.

Внутри запрещенной зоны на рис. 2 показаны возможные уровни энергий молекул арсенида галлия или фосфида индия, которые определяются из спектра излучения этих молекул. Для этого необходимо проводить специальные исследования спектров излучения молекул, как это выполнено для атомов в [14, 15]. Количество этих уровней энергии возбуждения молекул определить достаточно сложно, но в этом нет необходимости если знать, какую роль они выполняют в светодиоде.

Вводимые на поверхность полупроводниковой основы молекулы располагаются внутри столбообразных пустот на поверхности кристалла и связаны с кристаллом энергией адсорбции [17]. Так как энергия адсорбции для атомов больше, чем для молекул, это приводит к самопроизвольному распаду молекул на отдельные атомы. Атомы, обладающие средством к электрону, в свою очередь, взаимодействуя с электронами внутри кристалла на его поверхности, превращаются в отрицательные ионы.

В этой связи необходимо выяснить, какими частицами следует заполнять столбообразные пустоты, чтобы обеспечить максимальный электрический ток и соответственно максимальную светоотдачу в светодиодах.

Частицы легирования полупроводниковой основы в светодиодах

При прямом приложенном напряжении излучение внутри светодиода возникает вследствие спонтанного перехода свободных электронов с катода на анод. Свободные электроны возникают вследствие ионизации отрицательных ионов галлия и мышьяка или индия и фосфора под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля. Применяя для этого случая распределение Максвелла–Больцмана для концентрации свободных электронов, получаем [18]

$$n_e = n_a \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_b T} \left(1 - \frac{e^2 (2E_{\text{эф}} r_a)^2}{(\Delta E)^2} \right) \right], \quad (3)$$

где $n_a = n_s / (d_{\text{GaAs}} + d_{\text{Al}})$ – эффективная концентрация отрицательных ионов в столбообразной пустоте; $\Delta E = E_A - \delta E$ – энергия сродства атома к электрону за вычетом энергии смещения потенциала ионизации молекулы арсенида галлия или фосфида индия, которая определена выше; $E_{\text{эф}} = \Delta U / (d_{\text{GaAs}} + d_{\text{Al}})$ – эффективная напряженность внутри столбообразной пустоты вследствие приложенного напряжения ΔU между катодом и анодом; d_{GaAs} – диаметр молекулы арсенида галлия или фосфида индия; d_{Al} – то же молекулы алюминия. Скорость, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов ΔU , определяется по формуле

$$v_e = (2e\Delta U / m_e)^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь m_e – масса электрона.

В формуле (2) для арсенида галлия и для фосфида индия все величины внутри столбообразной пустоты определены. Концентрация свободных электронов возникает вследствие ионизации отрицательных ионов атомов галлия и мышьяка для арсенида галлия и отрицательных ионов атомов индия и фосфора для фосфида индия. Энергия, которую необходимо преодолеть в результате ионизации отрицательных ионов галлия и мышьяка, при легировании арсенидом галлия составит: $\Delta E_{\text{Ga}} = 0,3 - 0,19 = 0,11$ эВ и $\Delta E_{\text{As}} = 0,81 - 0,19 = 0,62$ эВ. Соответственно при легировании фосфидом индия: $\Delta E_{\text{In}} = 0,3 - 0,19 = 0,11$ эВ и $\Delta E_{\text{P}} = 0,746 - 0,19 = 0,556$ эВ.

В процессе работы диодов и транзисторов анод бомбардируется электронным потоком. При этом на поверхности полупроводниковой основы из арсенида галлия или фосфида индия возникают столбообразные пустоты квадратной формы, а на алюминиевом электроде анода формируются столбообразные пустоты почти круглой формы трехатомными молекулами из одинаковых атомов. В результате происходит объединение столбообразных пустот и возникает прямопролетный режим перехода электронов из катода в анод. Поэтому происходит интенсивный разогрев анода. Чтобы уменьшить температуру интенсивного разогрева в случае диодов и транзисторов, анод изготавливают более массивным.

В случае светодиодов ситуация сложнее. Столбообразные пустоты на катоде и аноде по их форме и размерам разные. Например, для арсенида галлия столбообразная пустота имеет поперечную площадь $2,8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, а для алюминия $1,234 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, что почти в два раза меньше, чем у арсенида галлия. Это значит, что мощность прямопролетного режима, который создает световой поток, меньше, чем мощность, формируемая электрическим током в светодиоде, и составляет $\sim 44 \%$. Этот экспериментальный факт был непонятен. Был также непонятен факт, что красные светодиоды давали возможность получать светимость, немного превышающую 50% мощности электрического тока, а синие светодиоды – несколько меньшую 50% .

Это обусловлено тем, что параллельные токи, текущие в одном направлении, на основании закона Ампера притягиваются друг к другу. Под действием этих сил при малой концентрации движущихся зарядов их концентрация в центре будет возрастать относительно больше, чем при более высокой концентрации в центре.

Таким образом, в стыковке столбообразных пустот катода и анода происходит частичное рассеяние электронного потока. Это не влияет на общее прохождение электрического тока в светодиоде, но заметно влияет на светоизлучение. Сама величина электрического тока при этом не изменяется, так как рассеянная часть тока проводимости переходит в ток смещения, а результирующий электрический ток есть сумма тока проводимости и смещения.

Когда все исходные данные полностью получены, можно произвести расчет вольт-амперных характеристик светодиодов при легировании арсенидом галлия или фосфидом индия, а также трех- или четырехатомными частицами внутри столбообразных пустот.

Вольт-амперные характеристики арсенида галлия и фосфида индия

Электрический ток внутри столбообразной пустоты определяется по формуле (2). Концентрация свободных электронов определяется ионизацией отрицательных ионов, которые нанесены на поверхность кристалла полупроводниковой основы арсенида галлия или фосфида индия двухатомными молекулами, трех- и, возможно, четырехатомными частицами на катоде. Ионизация отрицательных ионов происходит вследствие воздействия температуры и приложенного внешнего электрического поля. Внутренняя температура для светодиодов не превышает 300 К . Из уравнения (3) можно определить, при каком приложенном внешнем электрическом поле ΔU произойдет полная ионизация отрицательных ионов внутри столбообразной пустоты. На основании (3) это произойдет при выполнении следующего равенства применительно к арсениду галлия:

$$2\Delta U_{\text{Ga}}/(2d_{\text{GaAs}} + d_{\text{Al}})r_a = \Delta E_{\text{Ga}} \text{ или } \Delta U_{\text{Ga}} = \Delta E_{\text{Ga}}(2d_{\text{GaAs}} + d_{\text{Al}})/2r_a. \quad (5)$$

Для отрицательных ионов галлия $\Delta U_{\text{Ga}} = 0,33$ В. Для отрицательных ионов мышьяка $\Delta U_{\text{As}} = 2,28$ В. Для отрицательных ионов индия $\Delta U_{\text{In}} = 0,32$ В и для отрицательных ионов фосфора $\Delta U_{\text{P}} = 2,445$ В. Выше этих значений подаваемого напряжения ионизация отрицательных ионов достигает насыщения. В этом случае мощность светового излучения на основании формул (2) и (3) будет возрастать пропорционально $\sqrt{\Delta U}$.

Величина подаваемого напряжения ΔU определяет цвет светового излучения и его яркость. Чтобы обеспечить всю гамму излучения от инфракрасного до ультрафиолетового, подается питающее напряжение на светодиод от 1,3 до 3,5 В. Если в качестве вводимых примесей использовать арсенид галлия или фосфид индия, то в этих светодиодах отрицательные ионы индия и галлия будут полностью ионизованы, а отрицательные ионы мышьяка и фосфора до напряжения $\sim 3,5$ В будут увеличивать концентрацию свободных электронов в столбообразных пустотах и соответственно яркость светодиода с ростом подаваемого напряжения питания почти по экспоненте в соответствии с формулой (3).

Цвет излучения будет зависеть только от величины приложенного напряжения в соответствии с формулой Планка (1). Так как внутри столбообразной пустоты у катода электрический ток определяется движением свободных зарядов в виде электронов, такой электрический ток является током проводимости и поддается расчету.

На границе перехода между катодом и анодом рассеянная часть тока проводимости переходит в ток смещения. Измерения электрического тока производят во внешней цепи, а это значит, что измеряется только электрический ток смещения. В разных точках замкнутой электрической цепи могут существовать как токи смещения, так и токи проводимости. Для этого случая Максвелл сформулировал закон полного тока. В случае светодиодов при прямом приложенном напряжении на границах перехода у катода полный ток смещения во внешней электрической цепи переходит в полный ток проводимости, а у анода, наоборот, полный ток проводимости переходит в полный ток смещения. При этом теоретический расчет можно выполнить только для токов проводимости по (2) у поверхности катода. Рассмотрим подробнее, что происходит на границах перехода.

В формуле (2) концентрация свободных электронов определяется по (3), скорость движения – по (4) и сечение движущихся зарядов является сечением столбообразной пустоты у катода, а затем у анода. Конкретный расчет вольт-амперной характеристики для светодиода арсенида галлия приведен на рис. 3а, а для светодиода фосфида индия на рис. 3б. На рис. 3с приведена вольт-амперная характеристика тока проводимости для гетероструктуры, состоящей из разных четырех атомов. В каждой точке измерения напряжения возникает своя длина волны, излучаемая светодиодом.

Для всех типов светодиодов при прямом напряжении до двух вольт свободные электроны возникают вследствие ионизации отрицательных ионов, обладающих малой энергией сродства. В рассмотренном случае это атомы галлия и индия. При этом ток проводимости существенно не превышает 10 мА.

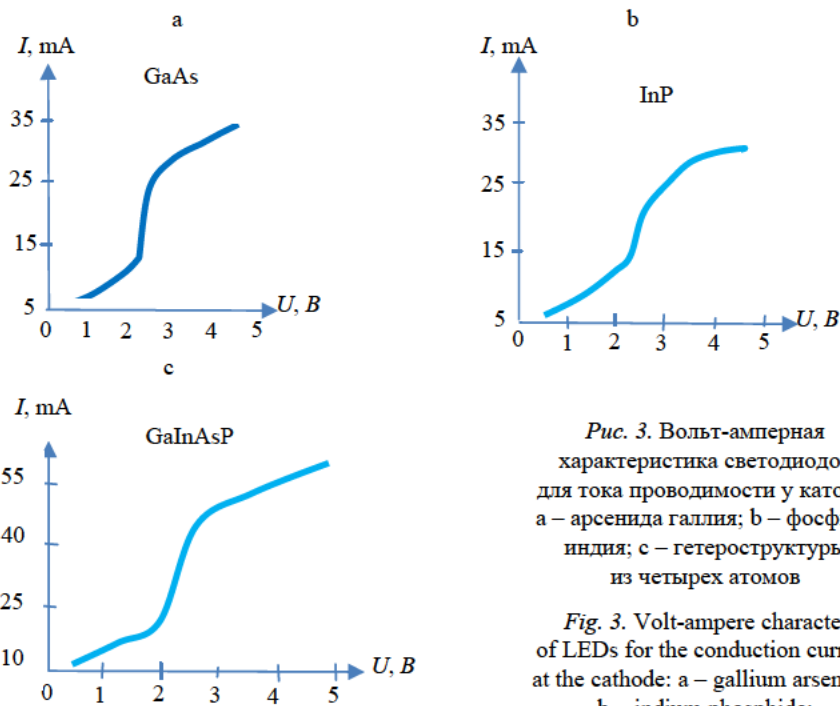


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика светодиодов для тока проводимости у катода: а – арсенида галлия; б – фосфида индия; с – гетероструктуры из четырех атомов

Fig. 3. Volt-ampere characteristic of LEDs for the conduction current at the cathode: a – gallium arsenide; b – indium phosphide; c – heterostructures of four atoms

По мере увеличения прямого напряжения более двух вольт возникает полная ионизация отрицательных ионов с энергией сродства $\sim 0,8$ эВ. В рассматриваемом случае это атомы мышьяка и фосфора. Электрический ток проводимости увеличивается почти в два раза, а энергия, передаваемая аноду, возрастает более чем в четыре раза. Светодиод при этом быстро разогревается и выходит со строя. Экспериментально пришли к выводу, что рабочее напряжение для светодиодов должно обеспечивать электрический ток не более ~ 10 мА. Теоретический расчет это подтверждает.

Оптимальные условия реализации светодиодов по цвету и мощности излучения

Пришли к выводу: чтобы светодиоды не выходили со строя при подаче напряжения более 2,5 В или резкого разогрева, они должны запитываться через балластное электрическое сопротивление R_x , как это показано на рис. 4. Практическое применение светодиодов позволило выяснить еще интересный факт.

В процессе излучения светодиода происходит переход свободного электрона с более высокого уровня энергии на нижележащий. На более высоком уровне энер-

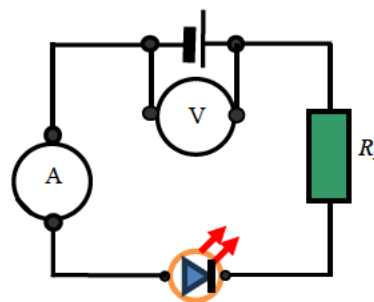


Рис. 4. Схема измерения ВАХ светодиода

Fig. 4. Measurement scheme of the volt-ampere characteristic of the LED

гии электрон несколько задерживается, т. е. обладает определенным временем жизни. Чтобы после ионизации отрицательного иона нейтральный атом на поверхности кристалла вследствие обмена с электронами кристалла вновь превратился в отрицательный ион, нужно определенное время. Если это учесть и получить максимальную светоотдачу, необходимо светодиод запитывать прерывистым напряжением и для этого следует использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ)¹.

На верхнем уровне энергии на поверхности катода концентрация свободных электронов возникает вследствие ионизации отрицательных ионов атомов галлия и мышьяка для арсенида галлия и ионизацией отрицательных ионов атомов индия и фосфора для фосфида индия. Процесс ионизации отрицательных ионов происходит из-за преодоления энергии сродства под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля с учетом смещения границы ионизации молекул полупроводниковой основы. В результате ионизация отрицательных ионов галлия и индия происходит вследствие преодоления энергии 0,1 эВ, а отрицательных ионов мышьяка и фосфора – вследствие преодоления соответственно энергий 0,62 и 0,556 эВ. В этой связи важно выяснить, как будет влиять изменение температуры и приложенного внешнего электрического поля на прохождение электрического тока проводимости внутри столбообразной пустоты. Рассмотрим этот процесс на примере светодиода на основе арсенида галлия.

Внутри столбообразной пустоты светодиода на основе арсенида галлия при напряжении выше 0,33 В и температуре 300 К отрицательные ионы галлия будут полностью ионизованы. Светодиоды функционируют от подаваемого напряжения 1,3 до 3,5 В и температуре ~300 К. В этих условиях галлий, а также индий будут полностью ионизованы. Изменение концентрации заряженных частиц (электронов) будет происходить только вследствие ионизации отрицательных ионов мышьяка или фосфора. При этом полная ионизация отрицательных ионов мышьяка или фосфора произойдет при температуре 300 К при напряжении: от 2,28 В и выше – для арсенида галлия; от 2,445 В и выше – для фосфида индия. При таких напряжениях отрицательные ионы галлия в светодиоде на основе арсенида галлия полностью ионизованы, а вероятность ионизации отрицательных ионов мышьяка определяется по формуле (3). Для светодиода на основе фосфида индия ситуация аналогичная, и начинается она с напряжения 2,445 В.

Конкретно выясним, как происходит процесс ионизации с изменением температуры и подаваемого напряжения на светодиод из арсенида галлия. Результаты расчета приведены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что при подаче напряжения 2,28 В вероятность ионизации отрицательных ионов мышьяка с возрастанием температуры изменяется достаточно заметно, но величина электрического тока изменяется незначительно. Как только подаваемое напряжение незначительно возрастает относительно критического 2,28 В

¹ ШИМ – это гвоздь в крышку гроба $p-n$ перехода и электролюминесценции.

при постоянной температуре, электрический ток увеличивается почти в два раза, а мощность электрического тока в светодиоде повышается в четыре раза. Температура светодиода резко возрастает, и он прекращает работу.

Таблица 2

Зависимость величины электрического тока от приложенного напряжения и температуры светодиода
The dependence of the magnitude of the electric current on the applied voltage and temperature of the LED

U , В	T , К	W	I , мА
2,28	300	$8,05 \cdot 10^{-3}$	13,13
2,28	350	$16,0 \cdot 10^{-3}$	13,29
2,28	400	$26,9 \cdot 10^{-3}$	13,38
2,28	450	$40,2 \cdot 10^{-3}$	13,55
2,29	300	1,0	26,11

W – вероятность ионизации отрицательных ионов мышьяка.

Аналогичная ситуация имеет место и для светодиода на основе фосфида индия. В этой связи электрический ток для всех светодиодов не должен превышать значение 10 мА, которое экспериментально установлено и теоретически обосновано.

ВЫВОДЫ

1. В светодиодах в качестве кристаллической основы применяется полупроводниковый кристалл с поверхностью в индексах Миллера [111], формируемый двухатомными молекулами арсенида галлия или фосфида индия, которые содержат атомы разного размера.

2. Кристалл арсенида галлия формируется объемными кластерами, внутри которых вследствие обменного взаимодействия между атомами возникает структура из положительно заряженных ионов атомов галлия и мышьяка в арсениде галлия и обменного взаимодействия между положительно заряженными ионами атомов индия и фосфора в фосфиде индия. Внутри кристалла положительно заряженный остов компенсируется облаком электронов.

3. Электрический ток диффузии и дрейфа противоречит определению электрического тока, данному Максвеллом в виде тока проводимости и тока смещения, которые связаны законом полного тока.

4. Поверхность кристалла покрыта монослоем двухатомных молекул из разных атомов с образованием пустот квадратной формы, площадь которых позволяет на поверхности кристалла в качестве примеси разместиться до четырех разных атомов с образованием отрицательных ионов. Внутри столбообразной пустоты проникает только одна частица из двух, трех или из четырех атомов.

5. В качестве катода используется кристалл арсенида галлия или фосфида индия с примесью, а в качестве анода – алюминий.

6. Отрицательные ионы разных примесей под воздействием температуры и приложенного внешнего электрического поля ионизируются и поставляют свободные электроны в столбообразную пустоту, где создают электрический ток проводимости, который определяет мощность светоизлучения светодиода.

7. Электрический ток питания светодиодов на основе арсенида галлия и фосфида индия не должен превышать ~ 10 мА, а питание должно быть преимущественно широтно-импульсным.

8. Размер светоизлучающей поверхности светодиода не должен заметно превышать 10×10 нм. Реальный размер $11,4 \times 11,4$ нм.

9. В зоне контакта анода и катода происходит частичное рассеяние электронного потока электрического тока проводимости. Это заметно уменьшает мощность светоизлучения. По теоретическим оценкам, мощность светоизлучения от мощности электрического тока может составить до 44 %, а с учетом закона Ампера может быть несколько увеличена по-разному: больше для красного и меньше для синего светодиодов. Экспериментальные данные: ~ 61 % – для красного светодиода; чуть менее 50 % – для синего.

10. Светоизлучение обусловлено нестыковкой полупроводников с p - и n -проводимостью и возникновением электролюминесценции, а обычным энергетическим переходом свободного электрона с верхнего энергетического уровня на нижележащий по схеме, как это происходит в атомах.

11. При измерениях вольт-амперных характеристик определяется электрический ток смещения во внешней цепи и напряжение на источнике тока. Эти данные не позволяют анализировать работу светодиода, так как светодиод работает на токе проводимости, который возникает внутри него. Какую долю он составляет от общего тока смещения, измеряемого во внешней цепи, трудно определить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибковский, В. П. Полупроводниковые лазеры / В. П. Грибковский. Минск: Университетское, 1988. 304 с.
2. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 227 с.
3. Gretchikhin, L. Negative Ions of Atoms, Diatomic and Triatomic Molecules // Military Technical Courier / L. Gretchikhin, V. Komarovskaya // Vojnotehnicki glasnik. 2016. Vol. 64, No 2. P. 447–464. <https://doi.org/10.5937/vojtehg64-9685>
4. Gretchikhin, L. I. Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors / L. Gretchikhin // Vojnotehnicki Glasnik. 2018. Vol. 66, No 3. P. 304–321. <https://doi.org/10.5937/vojtehg66-15935>
5. 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.
6. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл-полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на p - n пере-

- ходе / 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>
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. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 1: Структура 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>
 9. 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>
 10. Gretchihin, L. I. Formation of Emission in Diode Lasers with Evaporation of Various Impurities on the Main Semiconductor Crystal Having Affinity to Electron / L. I. Gretchihin // *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*. 2023. Vol. 7, No 1. P. 36–45. <https://doi.org/10.15406/aaaj.2023.07.00168>
 11. Гречихин, Л. И. Толстостенное покрытие в диоде Ганна для измерения мощности электромагнитного излучения СВЧ-диапазона / Л. И. Гречихин, Д. Ю. Олейник // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. № 8. С. 339–348. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-339-348>
 12. van Houselt, A. Colloquium: Time-Resolved Scanning Tunneling Microscopy / A. van Houselt, H. J. W. Zandvliet // *Reviews of Modern Physics*. 2010. Vol. 82, No 2. P. 1593–1605. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.82.1593>
 13. Шмермбекк, Ю. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Ю. Шмермбекк, Л. И. Гречихин. Берлин: Lambert. Academic Publishing, 2015. 80 с.
 14. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий: общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.
 15. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 405 с.
 16. Месяц, Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. М.: Наука, 2000. 424 с.
 17. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // *Авиационный вестник*. 2021. № 5. С. 21–28.
 18. Гречихин, Л. И. Методы введения примесей в металлы и полупроводниковые структуры для получения p - и n -проводимости / Л. И. Гречихин // *Авиационный вестник*. 2025. № 12. С. 6–16.
 19. Гречихин, Л. И. Физика: электричество и магнетизм / Л. И. Гречихин. 2-е изд., доп. М.: Воениздат, 1980. 182 с.
- Поступила 01.12.2025 Подписана в печать 10.02.2026 Опубликована онлайн 29.05.2026

REFERENCES

1. Gribkovskii V. P. (1988) *Semiconductor Lasers*. Minsk, Universitetskoye Publ. 304. (in Russian).
2. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Foundations of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications. 227 (in Russian).
3. Gretchikhin L., Komarovskaya V. (2016) Negative Ions of Atoms, Diatomic and Triatomic Molecules. *Vojnotehnički glasnik*, 64 (2), 447–464. <https://doi.org/10.5937/vojtehg64-9685>
4. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički glasnik*, 66 (2), 304–321. <https://doi.org/10.5937/vojtehg66-15935>

5. Grechikhin L. I. (2018) The Formation of p -, n -Conductivity and p - n -Jun. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coating*, 14 (5), 231–238 (in Russian).
6. Grechikhin 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229>
7. Grechikhin 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>
8. Grechikhin 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>
9. Grechikhin 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 69 (1), 34–49 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49>
10. Grechihin L. I. (2023) Formation of Emission in Diode Lasers with Evaporation of Various Impurities on the Main Semiconductor Crystal Having Affinity to Electron. *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*, 7 (1), 36–45. <https://doi.org/10.15406/aaaj.2023.07.00168>
11. Grechikhin L. I., Oleinik D. Yu. (2023) Thick-Walled Coating in a Gann Diode for Measuring the Power of Microwave Electromagnetic Radiation. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (8), 339–348. (in Russian). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-339-348>
12. van Houselt A., Zandvliet, H. J. W. (2010) Colloquium: Time-Resolved Scanning Tunneling Microscopy. *Reviews of Modern Physics*, 82 (2), 1593–1605. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1593>
13. Shmermbekk Yu., Grechikhin L. I. (2015) *Study of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin, Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
14. Grechikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 399 (in Russian).
15. Grechikhin L. I. (2008) *Nanoparticles and Nanotechnology*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 56 (in Russian).
16. Mesyats G. A. (2000) *Ectons in a Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc*. Moscow, Nauka Publ. 424 (in Russian).
17. Grechikhin L., Shmermbekk J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (in Russian).
18. Grechikhin L. I. (2025) Methods of Introducing Impurities into Metals and Semiconductor Structures to Obtain p - and n -Conductivity. *The Aviation Herald*, (12), 6-16 (in Russian).
19. Grechikhin L. (1980) *Physics: Electricity and Magnetism*. 2nd ed. Moscow, Voenizdat Publ. 182 (in Russian).

Received: 01 December 2025

Accepted: 10 February 2026

Published online: 29 May 2026