

Л.В. Чиркова, К.Т. Ермаганбетов, Л. Тезекбаева

*Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан
(E-mail: Tchlv_53@mail.ru)*

Принципы синергетики в подготовке специалистов физико-технического профиля

В статье рассмотрены вопросы использования основных принципов синергетики в подготовке специалистов физико-технического профиля при изучении дисциплины «Физическая электроника». Работа основана на многолетнем опыте преподавания авторами названной дисциплины на кафедре радиофизики и электроники Карагандинского государственного университета им. академика Е.А. Букетова. Показано, что система «полупроводниковая структура + внешний источник электрической энергии» может рассматриваться как открытая неравновесная термодинамическая система, в которой получают развитие кооперативные процессы стихийной самоорганизации за счет постоянного обмена энергией и веществом. Проанализированы физические процессы в биполярных транзисторах в активном режиме работы. Путем качественного теоретического анализа установлено, что в рассматриваемой системе возникают взаимодействующие самоорганизующиеся процессы, в результате которых происходит самопроизвольное понижение потенциального барьера в области эмиттерного и повышение аналогичного барьера в области коллекторного переходов; наблюдается самопроизвольная инжекция неосновных носителей заряда в базу, в результате чего происходит самопроизвольное увеличение концентрации неосновных носителей заряда в приграничном с переходом слое базы. Самопроизвольный перенос носителей заряда через базу к коллектору вызывает самопроизвольное понижение сопротивления коллекторного перехода до сопротивления прямосмещенного эмиттерного перехода и т.д. Все перечисленные выше процессы обуславливают самопроизвольное перераспределение напряжения источника питания, в результате чего мощность на выходе транзистора начинает превышать мощность на его входе, т.е. биполярный транзистор будет усиливать мощность.

Ключевые слова: синергетика, открытая система, полупроводниковая структура, биполярный транзистор, режимы работы, теоретический анализ, процессы самоорганизации.

Основными критериями учебной деятельности вузов являются качественная подготовка специалистов, их востребованность и конкурентоспособность на рынке труда. Стремительно меняющийся мир ставит перед государством, обществом и высшей школой задачи ее реформирования, создания современной индустрии образования. Проблема подготовки специалистов сегодня требует кардинально новой научно-педагогической основы, что определяет ее необходимость и актуальность.

Развитие современного образования можно определить как нелинейное, что связано в том числе и с социально-экономическими преобразованиями в стране. Требования общества к системе образования включают в себя несколько аспектов, основными из которых являются усиление экологической составляющей образовательных программ, реализация гуманитарного компонента в естественнонаучном и инженерном образовании, формирование современной естественнонаучной картины мира и ряд других. Все перечисленные аспекты находят свое отражение в рамках междисциплинарного научного направления — синергетики, которое базируется на результатах исследований в области нелинейной динамики, термодинамики необратимых процессов, статистической физики, физики лазеров, качественной теории дифференциальных уравнений и т.д. [1].

В течение довольно непродолжительного времени, прошедшего с момента своего возникновения, синергетика, как теория неравновесных процессов, превращается во всеобщую теорию развития, имеющую серьезные мировоззренческие последствия. Смысл и содержание этой новой интегральной науки состоит в том, что в открытых системах, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом и информацией, возникают процессы стихийной самоорганизации. Они приводят к возникновению из физического хаоса устойчивых упорядоченных процессов и структур с новыми свойствами систем. Это общее определение справедливо для систем любой природы. Синергетика изучает конкретные принципы и механизмы самоструктурирования естественных и технических систем. То есть основное внимание она сосредотачивает на кооперативных, когерентных и самосогласованных процессах, происходящих в сложных нелинейных системах.

Вообще понятие системы является для синергетики объединяющим. При этом, помимо формирования общей системной концепции — самоорганизации, синергетика учитывает конкретное, например, физическое, содержание рассматриваемых явлений и процессов [2]. Среди множества определений понятие «система» многие исследователи выделяют как самое оптимальное определение, сформулированное П.К. Анохиным: «Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношение приобретают характер взаимодействия компонентов на получение фиксированного полезного результата» [2].

В настоящее время общепризнанными фундаментальными свойствами синергетических систем являются обязательный обмен с внешней средой (энергией, веществом, информацией) и непереносимое взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы.

На современном этапе развития общества, в условиях усложнения производственных отношений, его технической и социальной инфраструктуры, решающим оказывается изменение отношения образовательных структур к подготовке специалистов в любой области. Это существенным образом зависит от организации целостного педагогического процесса, который заключается в создании новых организационных приемов, объединении научных направлений, инновационной деятельности, которые можно осуществить посредством внедрения синергетического подхода в образовании.

Использование синергетического подхода позволяет по-новому раскрыть научно-педагогическое знание, ориентированное на многомерность, многокомпонентность познаваемых процессов, обнаружение в них нераскрытых или недостаточно раскрытых состояний, признание большой роли случайности в их развитии [3].

Чаще всего под синергетикой понимается теория самоорганизации. В то же время необходимо отметить, что синергетика — более комплексная система, нежели самоорганизация. Так, Г.Хакен [1] определяет самоорганизующиеся системы как системы, обретающие присущие им структуры или функции без какого-то вмешательства извне. Самоорганизация имеет место исключительно в таких системах, которые обладают высоким уровнем сложности и достаточным количеством элементов, связи между которыми имеют не жесткий, а вероятностный характер. Отличительной особенностью процессов самоорганизации является нецеленаправленный, естественный, спонтанный характер. Эти процессы, хотя и протекают во взаимодействии системы с окружающей средой, остаются автономными, не зависящими от среды. Сложность открытых систем представляет широкие возможности для существования в них коллективных явлений.

Понятие открытых физических систем широко применяется в физике полупроводников и полупроводниковых приборов, составляющих основу современной электроники и микроэлектроники.

Полупроводниковые кристаллы являются сложными динамическими системами, в которых возможно возникновение электрических неустойчивостей (срыв тока, спонтанные колебания тока или напряжения, переключение и гистерезис в вольтамперной характеристике и т.д.) [4, 5]. Большинство подобных неустойчивостей можно рассматривать как самоорганизацию, возникающую в термодинамической неравновесной системе. Чаще всего электрические неустойчивости оказывают негативное влияние на характеристики полупроводниковых приборов, но в отдельных случаях используются специально. Например, для генерации СВЧ-излучения в диапазоне от 0,1 до 1000 Гц, для усиления в гигагерцевом диапазоне частот, где не могут быть использованы обычные транзисторы [6].

На основе многолетнего опыта преподавания дисциплины «Физическая электроника» на кафедре радиофизики и электроники Карагандинского государственного университета имени Е.А. Букетова авторы разработали концепцию синергетического рассмотрения основных физических процессов, протекающих в полупроводниковых структурах и приборах (таких как $p-n$ -переход, туннельный диод, диод Ганна, лавинно-пролетный диод, некоторые многослойные полупроводниковые структуры), и электрических неустойчивостей в них. Во всех этих структурах и устройствах, как было показано авторами [7–10], имеют место процессы самоорганизации. Теоретические изыскания были подкреплены многочисленными констатирующими (проведение отдельных упражнений и заданий по отдельным темам дисциплины) и обучающими (проведение отдельных занятий) педагогическими экспериментами.

Представленная статья продолжает цикл публикаций авторов, посвященных рассмотрению процессов самоорганизации в полупроводниковых структурах и приборах.

В основу статьи легли результаты теоретического анализа процессов самоорганизации, происходящих в полупроводниковых приборах с двумя электронно-дырочными переходами на примере биполярных транзисторов, полученные одним из авторов при выполнении магистерской диссертации. В

ходе работы были рассмотрены процессы обмена с внешней средой и взаимодействия в биполярном транзисторе в режиме усиления.

Как известно, существует четыре режима работы биполярного транзистора: активный, насыщения, отсечки и инверсный. В активном режиме эмиттерный переход включен в прямом, а коллекторный переход — в обратном направлении. В режиме насыщения и эмиттерный, и коллекторный переходы включены в прямом направлении. В режиме отсечки и эмиттерный, и коллекторный переходы включены в обратном направлении. В инверсном режиме коллекторный переход включен в прямом, а эмиттерный переход — в обратном направлении.

Рассмотрим физические процессы и участие носителей заряда в самоорганизующихся процессах, происходящие в биполярном транзисторе при различных режимах работы.

Режим усиления слабых сигналов. В режиме усиления источника энергии эмиттерный переход транзистора включен в прямом, а коллекторный переход — в обратном направлении.

Модель (а), энергетическая диаграмма (б) биполярного транзистора и схемы физических процессов, происходящих в нем, показаны на рисунке 1.

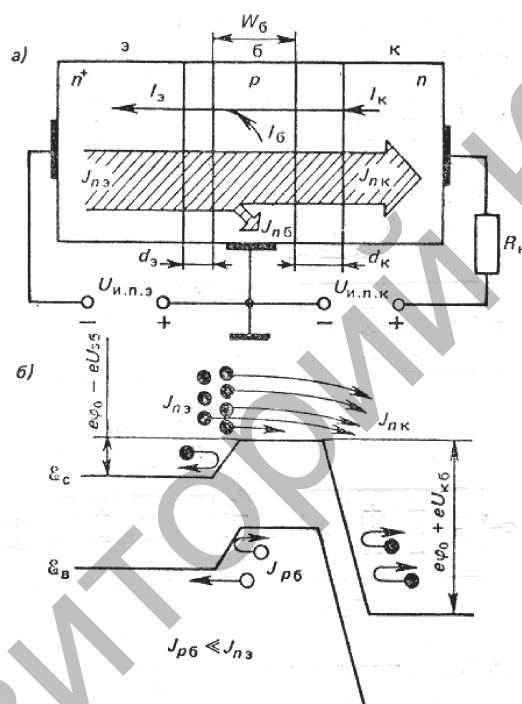


Рисунок 1. Модель (а), энергетическая диаграмма (б) биполярного транзистора $n^+ - p - n$ и схемы физических процессов, происходящих в нем [11]

На рисунке 1 даны следующие обозначения: $I_э, I_б, I_к$ — эмиттерный, базовый, коллекторный токи; $J_{nэ}, J_{nб}, J_{nk}, J_{nб}$ — диффузионные составляющие токов; $U_{ипэ}, U_{ипк}$ — источники питания; $q\phi_эб, qU_кб$ — высота потенциального барьера в равновесном состоянии, *самопроизвольное уменьшение и увеличение* высоты потенциального барьера, соответственно, эмиттерного и коллекторного переходов. Электроны обозначены темными кругами, дырки — светлыми кругами.

Если биполярный транзистор, состоящий из полупроводников n - и p -типов с носителями заряда (электронами и дырками) и внешних источников $U_{ипэ}$ и $U_{ипк}$, считать как единую термодинамическую систему «биполярный транзистор + источники энергии», то она удовлетворяет всем требованиям синергетической науки:

- система состоит из многих элементов: носители заряда в полупроводниках, полупроводники n - и p -типов, источники энергии $U_{ипэ}, U_{ипк}$;
- элементы системы между собой обмениваются энергией и электронами, т.е. система находится в неравновесном состоянии;
- носители заряда на пути свободного пробега *самопроизвольно увеличивают* свою энергию за счет мощности внешних источников энергии и при столкновении с дефектами кристаллической ре-

шетки полностью отдают энергию кристаллу. Температура кристалла растет. Нагретый кристалл избыток тепловой энергии *самопроизвольно отдает* окружающей среде. Следовательно, система «биполярный транзистор + источники энергии» является открытой, неравновесной термодинамической системой.

Рассмотрим физические процессы и процессы самоорганизации, происходящие в биполярном транзисторе в режиме усиления. Функционирование биполярного транзистора в режиме усиления основано на *самопроизвольном* изменении сопротивления обратносмещенного коллекторного *p-n*-перехода при *самопроизвольной инжекции* неосновных носителей заряда.

Сопротивление обратносмещенного коллекторного *p-n*-перехода очень велико — несколько мегаом и более. Отметим одно важное обстоятельство. *Обратносмещенный p-n-переход* (рис. 2, а) *оказывает сопротивление только потокам основных носителей заряда*, неосновные носители заряда проходят его, «самопроизвольно скатываются с потенциального барьера», практически не встречая сопротивления (рис. 2, б). Следовательно, при достаточно высоком уровне инжекции можно значительно увеличить ток в обратносмещенном *p-n*-переходе и тем самым снизить его сопротивление.

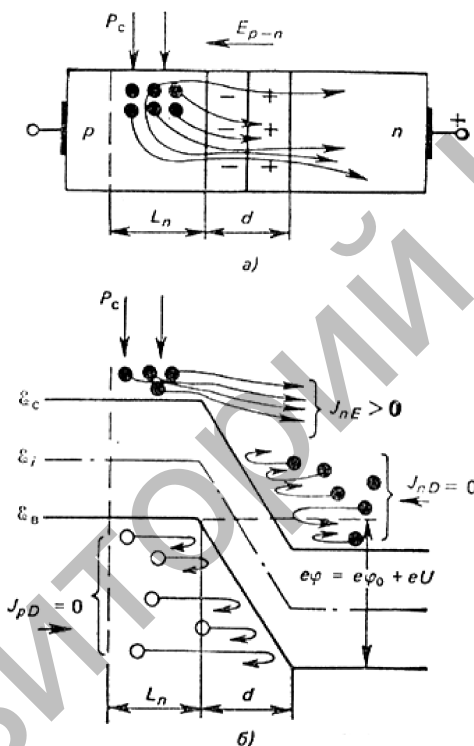


Рисунок 2. Схема инжекции электронов в *p*-область (а) и на энергетической диаграмме (б) [11]

При приложении прямого смещения к эмиттерному переходу дырки *самопроизвольно инжектируются* в *n*-слой, электроны *самопроизвольно инжектируются* в *p*-слой. Ток через эмиттерный переход должен определяться суммой потоков, *самопроизвольно инжектируемых* электронов и дырок. Биполярные транзисторы изготавливают так, чтобы концентрация электронов в эмиттере значительно превышала концентрацию дырок в базе. В этом случае малым потоком дырок, *самопроизвольно инжектируемых* из базы в эмиттер, можно пренебречь и считать, что при прямом смещении весь ток эмиттера определяется только потоком *самопроизвольно инжектированных* электронов:

$$|J_{n3}| \sim I_{n3} \approx I_3. \quad (1)$$

С целью уменьшения потерь на рекомбинацию инжектированных в базу электронов эмиттерный и коллекторный переходы располагают на расстоянии, меньшим диффузионной длины носителей заряда: $W_6 \ll L_n$.

При прямом смещении эмиттерного перехода поток *самопроизвольно инжектированных* в базу электронов, практически без потерь на рекомбинацию (база тонкая и концентрация дырок мала), доходит до коллектора, поэтому $J_{n3} \approx J_{nk}$, или $I_3 \approx I_k$. В результате ток коллектора *самопроизвольно*

повышается от очень малого значения обратного тока I_{k0} до $I_k \approx I_\varepsilon$. По этой причине ток в обратносмещенном коллекторном переходе *самопроизвольно сравнивается* с током в прямосмещенном эмиттерном переходе.

Увеличение тока в обратносмещенном коллекторном переходе при неизменном напряжении источника питания $U_{ипк}$ физически означает, что сопротивление коллекторного перехода *самопроизвольно уменьшилось* и стало сравнимым с сопротивлением эмиттерного перехода. Следовательно, в результате инжекции неосновных носителей заряда происходит *самопроизвольное изменение* сопротивления коллекторного перехода.

Сопротивление обратносмещенного коллекторного перехода *самопроизвольно снижается* пропорционально *самопроизвольному возрастанию* тока инжекции. В результате инжекции ток коллектора может возрасти на 4-5 порядков, сопротивление его при этом соответственно на 4-5 порядков *самопроизвольно снизится*.

Сопротивление нагрузки R_k в цепи коллектора обычно носит постоянный характер и составляет около 1 МОм. Поскольку сопротивление коллектора *самопроизвольно уменьшается* и *становится* значительно меньшим сопротивления нагрузки, падением напряжения на коллекторе можно пренебречь и считать, что все напряжение источника питания $U_{ипк}$ будет сосредоточено на нагрузке: $U_{ипк} \approx I_\varepsilon R_n$.

Падение напряжения на эмиттере равно: $U_{эб} = U_{вх} = I_\varepsilon R_\varepsilon$. Сопротивление нагрузки R_n значительно превышает величину сопротивления R_ε прямосмещенного эмиттерного перехода. Поэтому при сравнимых токах эмиттера и коллектора будет выполняться соотношение $U_{вых} \gg U_{вх}$. Выделяемая на нагрузке мощность $P_{вых} \approx U_{вых} I_\varepsilon$, а мощность, потребляемая в эмиттерной цепи, $P_{вх} = U_{вх} I_\varepsilon$. Так как $U_{вых} \gg U_{вх}$, то $P_{вых} \gg P_{вх}$.

Таким образом, биполярный транзистор является усилительным прибором, так как усиливает мощность.

Из приведенного выше анализа работы транзистора в режиме усиления можно сделать следующие выводы:

Система «биполярный транзистор + источники энергии $U_{ипэ}$ и $U_{ипк}$ » является открытой, неравновесной термодинамической системой, удовлетворяющей всем требованиям синергетики.

В рассматриваемой системе возникают следующие самоорганизующиеся процессы:

– в зависимости от особенностей взаимодействий источников энергий и биполярного транзистора потенциальный барьер эмиттерного перехода *самопроизвольно понижается*, а потенциальный барьер коллекторного перехода *самопроизвольно повышается*;

– при приложении смещения в прямом направлении *самопроизвольно* возникает инжекция неосновных носителей заряда в базу, что приводит к *самопроизвольному* увеличению концентрации неосновных носителей заряда в приграничном переходном слое базы;

– *самопроизвольный* рост концентрации неосновных носителей заряда в приграничном с переходом слое базы приводит к *самопроизвольному* переносу неосновных носителей заряда по базе от эмиттера к коллектору;

– *самопроизвольный* перенос носителей заряда через базу к коллектору вызывает *самопроизвольное* понижение сопротивления коллекторного перехода до сопротивления прямосмещенного эмиттерного перехода;

– *самопроизвольное* уменьшение сопротивления коллекторного перехода приводит *самопроизвольному перераспределению* напряжения источника питания $U_{ипк}$ и в результате все напряжение источника питания $U_{ипк}$ будет *самопроизвольно* сосредотачиваться на нагрузке;

– это в результате приводит к *самопроизвольному перераспределению* напряжения источника питания, $U_{ипк}$ мощность на выходе $P_{вых} \approx U_{вых} I_\varepsilon$ станет больше мощности на входе $P_{вх} = U_{вх} I_\varepsilon$, $P_{вых} \gg P_{вх}$, т.е. биполярный транзистор будет усиливать мощность.

Таким образом, в полупроводниковой структуре с двумя электронно-дырочными переходами и, соответственно, в биполярном транзисторе имеют место взаимодействующие самоорганизующиеся процессы, которые сопровождаются *самопроизвольным перераспределением* напряжения источника питания транзистора, в результате чего мощность на выходе транзистора начинает превышать мощность на его входе, т.е. биполярный транзистор усиливает мощность входного сигнала.

Список литературы

- 1 Хакен Г. Синергетика: пер. с англ. / Г.Хакен. — М.: Мир, 1980. — 405 с.
- 2 Колесников А.А. Прикладная синергетика: проблемы и перспективы / Системный анализ и прикладная синергетика: сб. науч. тр. VIII Всерос. науч. конф. (18–20 сентября 2017 г.). — Н. Архыз: Изд-во ТРТУ, 2017. — С. 7–17.
- 3 Пелюхова Е.Б. Синергетика в физических процессах: самоорганизация физических систем: учеб. пос. / Е.Б. Пелюхова, Э.Е. Фрадкин. — СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2011. — 320 с.
- 4 Шелль Э. Самоорганизация в полупроводниках: пер. с англ. / Э. Шелль. — М.: Мир, 1991. — 460 с.
- 5 Бонч-Бруевич В.Л. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках / В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов. — М.: Наука, 1972. — 415 с.
- 6 Усыченко В.Г. Электронная синергетика. Физические основы самоорганизации и эволюции материи: курс лекций / В.Г. Усыченко. — СПб.: Лань, 2010. — 235 с.
- 7 Ermaganbetov K.T. Electronic mechanisms of instability in semiconductor structures / K.T. Ermaganbetov, L.V. Chirkova, N.T. Arinova // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2015. — № 4 (80). — С. 4–11.
- 8 Ermaganbetov K.T. Nonlinear phenomena and instability in semiconductors / K.T. Ermaganbetov, L.V. Chirkova, E.V. Skubnevsky, N.T. Arinova // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2016. — № 1(81). — С. 39–45.
- 9 Ermaganbetov K.T. Physical processes in the Gunn diode and the energy balance / K.T. Ermaganbetov, L.V. Chirkova, E.V. Skubnevsky, N.T. Arinova, A. Omirbek // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2017. — № 1(85). — С. 15–21.
- 10 Ermaganbetov K.T. Current instability phenomena in a tunnel diode and electron self-organization processes / K.T. Ermaganbetov, L.V. Chirkova, K.M. Makhanov, K.S. Rozhkova, N.T. Arinova, A. Kurmash // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2019. — № 2(94). — С. 8–14.
- 11 Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. пос. / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. — М.: Высш. шк., 1987. — 479 с.

Л.В. Чиркова, Қ.Т. Ермағанбетов, Л. Тезекбаева

Физика-техника мамандығы бойынша мамандарды дайындауда синергетика ілімінің ұстанымдары

Мақалада «Физикалық электроника» пәнін оқу кезінде физика-техникалық бейіндегі мамандарды даярлауда синергетиканың негізгі қағидаларын қолдану мәселелері қарастырылған. Жұмыс Е.А. Қарағанды мемлекеттік университетінің радиофизика және электроника кафедрасында аталған пән бойынша көп жылдық білім беру тәжірибесіне негізделген. «Жартылай өткізгіштік құрылым + электр энергиясының сыртқы көзі» жүйесін энергия мен затпен тұрақты алмасу есебінен стихиялық өзін-өзі ұйымдастырудың кооперативтік процестері дамитын ашық тепе-тең емес термодинамикалық жүйе ретінде қарастырылуы мүмкін. Қосөрісті транзисторлардағы белсенді жұмыс режиміндегі физикалық процестер талданған. Сапалы теориялық талдау арқылы қарастырылып отырған жүйеде өзара ықпал ететін өзін-өзі ұйымдастыру процестері пайда болады, нәтижесінде эмиттерлік саласындағы әлеуметтік кедергінің өздігінен төмендеуі және коллекторлық өту саласындағы ұқсас бартердің артуы орын алады; негізгі есе заряд тасығыштардың базаға өздігінен инжекциясы байқалады, соның нәтижесінде база қабатының ауысуымен шекара мамандығы заряд тасығыштарда негізгі емес заряд тасығыштардың шоғырлануының өздігінен артуы орын алады. Заряд тасығыштарды база арқылы коллекторға өздігінен көшіру коллекторлық өту кедергісінің тікелей ығыстырылған эмиттерлік өту және т.б. кедергісіне дейін өздігінен төмендеуін тудырады. Жоғарыда аталған барлық процестер қорек көзі кернеуінің өздігінен қайта таралуына себепші болады, соның нәтижесінде транзистор шығысындағы қуат оның кірісіндегі қуаттан асып түседі, яғни биполярлы транзистор қуатты күшейтеді.

Кілт сөздер: синергетика, ашық жүйе, шалаөткізгіш құрылым, қосөрісті транзистор, жұмыс күйі, өздігінен жүретін үдерістер.

L.V. Chirkova, K.T. Ermaganbetov, L. Tezekbaeva

Principles of synergetics in training of specialists physical and technical profile

The article discusses the use of the basic principles of synergetics in the training of physicists in the study of the discipline «Physical Electronics». The work is based on many years of experience in teaching the discipline at the Department of Radiophysics and Electronics of Karaganda State University named after E.A. Buketova. It is shown that the system «semiconductor structure + external source of electrical energy» can be considered as an open nonequilibrium thermodynamic system in which cooperative processes of spontaneous self-organization due to the constant exchange of energy and matter develop. The physical processes in bipolar transistors in the active mode of operation are analyzed. By means of a qualitative theoretic

cal analysis, it was established that the system under consideration interacts with self-organizing processes that result in spontaneous lowering of the potential barrier in the emitter region and an increase in similar barrier in the region of collector junctions; spontaneous injection of minority charge carriers into the base is observed, resulting in a spontaneous increase in the concentration of minority charge carriers in the base layer adjacent to the transition. Spontaneous transfer of charge carriers through the base to the collector causes a spontaneous decrease in the collector junction resistance to the resistance of a forward-biased emitter junction, etc. All of the above processes determine the spontaneous redistribution of the voltage of the power source, as a result of which the power at the output of the transistor begins to exceed the power at its input, i.e. A bipolar transistor will amplify the power.

Keywords: synergetics, open system, semiconductor structure, bipolar transistor, operating modes, theoretical analysis, self-organization processes.

References

- 1 Haken, G. (1980). *Sinerhetika [Synergetics]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- 2 Kolesnikov, A.A. (2017). Prikladnaia sinerhetika: problemy i perspektivy [Applied synergetics: problems and prospects]. Collection of works System analysis and applied synergetics `17: VIII Vserossiiskaiia nauchnaia konferentsiia (18-20 sentiabria 2017 hoda) — VIII All-Russian Scientific Conference (p. 7–17). New Arkhyz: Publishing House of TRTU [in Russian].
- 3 Pelyukhova, E.B. & Fradkin, E.E. (2011). *Sinerhetika v fizicheskikh protsessakh: samoorhanizatsiia fizicheskikh sistem [Synergetics in physical processes: self-organization of physical systems]*. Saint Petersburg – Moscow – Krasnodar: Lan [in Russian].
- 4 Shell, Je. (1991). *Samoorganizatsiia v poluprovodnikakh [Self-organization in semiconductors]*. Moscow: Mir [in Russian].
- 5 Bonch-Bruевич, V.L., Zviagin, I.P., & Mironov, A.G. (1972). *Domennaia elektricheskaia neustoichivost v poluprovodnikakh [Domain electric instability in semiconductors]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- 6 Usychenko V.G. (2010) *Elektronnaia sinerhetika. Fizicheskie osnovy samoorhanizatsii i evoliutsii materii [Electronic Synergetics. Physical foundations of self-organization and evolution of matter]*. Saint Petersburg: Lan [in Russian].
- 7 Ermaganbetov, K.T., Chirkova, L.V. & Arinova, H.T. (2015). Electronic mechanisms of instability in semiconductor structures. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriya Fizika — Bulletin of the University of Karaganda-Physics, 4(80)*, 4–11 [in Russian].
- 8 Ermaganbetov, K.T., Chirkova, L.V., Skubnevsky, E.V. & Arinova, H.T. (2016). Nonlinear phenomena and instability in semiconductors. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriya Fizika — Bulletin of the University of Karaganda-Physics, 1(81)*, 39–45 [in Russian].
- 9 Yermaganbetov, K.T., Chirkova, L.V., Skubnevsky, E.V., Makhanov, K.M., Arinova, H.T. & Omirbek, A. (2017). Physical processes in the Gunn diode and the energy balance. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriya Fizika — Bulletin of the University of Karaganda-Physics, 1(85)*, 15–21 [in Russian].
- 10 Yermaganbetov, K.T., Chirkova, L.V., Makhanov, K.M., Rozhkova, K.S., Arinova, H.T. & Kurmash, A. (2019). Current instability phenomena in a tunnel diode and electron self-organization processes. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriya Fizika — Bulletin of the University of Karaganda-Physics, 2(94)*, 8–14 [in Russian].
- 11 Pasyukov, V.V. & Chirkin, L.K. (1987). *Poluprovodnikovye pribory [Semiconductor devices]*. Moscow: Vysshiaia shkola [in Russian].