
ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

МЕТОДИКА ФИЗИКИ

METHODOLOGY OF PHYSICS

ӘОЖ 538.9

Қ.Т. Ермағанбетов, Л.В. Чиркова, А.Н. Құрмаш, Г.И. Мусина

*Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті Қазақстан
(E-mail: ichlv_53@mail.ru)*

***P-n*-ауысуда жүретін физикалық үдерістердегі синергетика элементтері**

Қазіргі кезде ғылыми ақпараттар легінің күрт өсуі жағдайында әртүрлі ғылым салаларына ортақ қасиеттерінің, ортақ үдерістердің пайда болып интеграциялау құбылыстарының тууына, пайда болуына әкелуде. Материяның дамуына орнықсыздықтар мен критикалық күйлердің әсерін зерттеу ғылым саласындағы негізгі бағыттардың бірі болып табылады. Материяның дамуына онда жүретін орнықсыздықтардың, жаңа күйлердің, жаңа құрылымдардың пайда болу механиздерін зерттеу ғылым саласында жаңа бағыттың пайда болуына әкелді. Басқаша айтқанда, даму ерекшелігі, ерекше ұстанымы бар жаңа ғылым саласы пайда болды. Күрделі, бейсызық термодинамикалық жүйелерде уақыт бойынша, кеңістік бойынша реттелген құрылымдар өздігінен пайда болады. Бұл жағдайда термодинамикалық жүйе бифуркация нүктесі маңында орнықсыз күйде болады. Кеңістік, уақыт бойынша реттелген құрылымдар қоршаған ортамен энергиямен, ақпаратпен, затпен алмаса алатын, күйі бейсызық динамикалық теңдеулермен сипатталатын термодинамикалық жүйелерде ғана пайда болады. Шалаөткізгіштен жасалған аспапты және сыртқы энергия көзін термодинамикалық тепе-теңдіктен ауытқыған, ашық термодинамикалық жүйе деп қарастыруға болады. Бұндай жүйеде өздігінен жүретін үдерістер пайда болуға тиісті. Жалпы шалаөткізгіштен жасалған кез келген құралдың жұмысы өздігінен жүретін құбылыстарға негізделген. Сол себептен шалаөткізгіштен жасалған құралдардағы өздігінен жүретін құбылыстарды зерттеудің маңызы ерекше. Жұмыста көпшілік өткізгіш құралдардың негізінде жататын *p-n*-ауысуда өздігінен жүретін үдерістер талданған.

Кілт сөздер: синергетика, термодинамика, *p-n*-ауысу, туннельдік диод, энергия диаграммасы.

Кейінгі кездері тез дамып келе жатқан ғылыми бағыттардың ішінен синергетиканы – күрделі жүйелерде өздігінен жүретін үдерістерді зерттейтін ғылым саласын ерекше атап өтуге болады. Синергетиканың дамуына онда қарастырылатын құбылыстардың қасиеттерінің ғылымның басқа салаларында зерттелетін құбылыстардың қасиеттерімен тығыз байланысы, онда туындайтын тұжырымдардың жалпыға бірдей ортақтығы әсер етеді. Мысалы, синергетиканың негізгі қорытындыларын, тұжырымдарын бейсызық механикасында да, фазалық көшу үдерісін талдау барысында да, шалаөткізгіштен жасалған аспаптардың жұмыс барысын талдағанда да пайдалануға болады.

Синергетика ілімінің негіздері Г.Хакеннің [1], Э. Шелльдің [2] монографияларында жақсы талданған. Әсер етуші коздырғыштың (фотокоздырғыш) қуаты төмен болған жағдайдағы синергетика құбылысының алғашқы белгілері Р. Бьюб пен С.М. Рывкин [3, 4] еңбектерінде қарастырылады.

Синергетика — бұл табиғаттары термодинамикалық жүйелерде өздігінен жүретін үдерістердің негізінде жатқан ортақ заңдылықтарды, қағидаларды талдауға, зерттеуге арналған ғылым саласы. Ол өткен ғасырдың 70-жж. пайда болды.

Онда орнықсыз күйдегі күрделі бейсызық жүйелерде уақыт, кеңістік бойынша реттелген үдерістердің пайда болуын өз бетімен жүретін үдерістер дейді.

Термодинамикалық жүйеде өз бетімен жүретін үдерістер пайда болу үшін қажетті шарттар:

- термодинамикалық жүйе ашық, яғни оның сыртқы ортамен, затпен, энергиямен, ақпаратпен алмасу мүмкіндігі болу керек;
- жүйе қозған күйде, термодинамикалық тепе-теңдік күйінен шығарылған күйде болу керек;
- жүйе бейсызық, оны құраушыларының саны өте көп, құраушылары арасындағы әсерлесу күрделі болу керек.

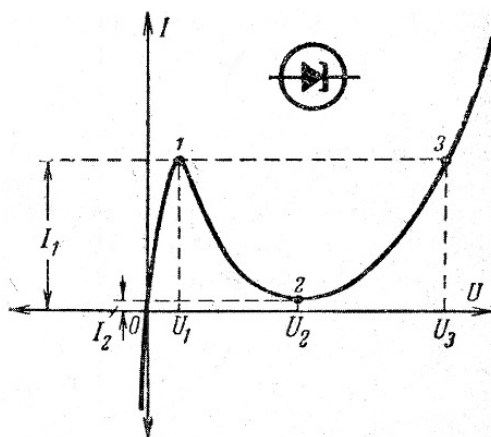
Синергетика күрделі жүйелерде пайда болып өздігінен жүретін үдерістерді зерттейді, талдайды. Термодинамикалық орнықсыз күйдегі ашық термодинамикалық аса күрделі емес орнықсыз күйінен реттелген күрделі күйіне көшуін өздігінен көшу дейді. Өздігінен көшу барысында жүйенің ескі күйі ыдырап, жаңа қасиеттері бар жүйе пайда болады. Синергетика орнықсыз күйдегі термодинамикалық жүйені басқа орнықсыз күйге өз бетімен көшуінің физикалық механизмдерін анықтаумен айналысады.

Сызықтық емес жүйеде орнықсыздық үстемдік етеді. Бейсызық жүйелерде тәуелсіздік қағидасы орындалмайды. Бейсызық жүйелер сыртқы қоздырғыш әсерінен бір орнықсыз күйден екінші орнықсыз күйге біртіндеп ауыспай, секірмелі түрде көшеді. Бейсызық ашық жүйемен ортаның арасында оң кері байланыс болады. Жүйе ортаға әсер ету барысында ортада пайда болған үдеріс жүйеге әсер етіп, онда бейсызық үдерістер туғызуы мүмкін. Жүйемен ортаның арасындағы оң кері байланыстың әсерінен жүйеде тосын үдерістер пайда болуы мүмкін.

Ашық термодинамикалық жүйе ортамен тығыз әсерлесуі барысында диссипативтік деп аталатын ерекше күйге көшуі мүмкін. Микродеңгейде жүретін үдерістер жүйедегі әсерлесу нәтижесінде макродеңгейде жаңа сипат алуын жүйенің диссипаттығы деп атайды. Диссипативтік нәтижесінде орнықпаған термодинамикалық жүйеде өздігінен жаңа құрылымдар болуы, ретсіздіктен реттелген құрылымдар, материяның жаңа динамикалық күйі пайда болуы мүмкін.

Шалаөткізгіштерде өздігінен жүретін үдерістер және орнықсыз фазалық ауысуларды зерттеу ғалымдардың назарын аудартатын мәселелер. Біріншіден, өз бетімен жүретін үдерістер шалаөткізгіштен жасалған көпшілік аспаптардың физикалық негізі. Екіншіден, шалаөткізгіш күрделі бейсызық динамика заңдарын, өздігінен жүретін үдерістерді зерттеуге мүмкіндік беретін өте ыңғайлы жүйе. Шалаөткізгіштерде жүретін физикалық құбылыстарды зерттеу аса қиынға соқпайды.

Шалаөткізгіштен жасалған аспаптардың жұмысы онда жүретін физикалық құбылыстардың ерекшеліктеріне негізделген [5–7]. Мысалы, туннельдік диодтың жұмысы қалыңдығы өте аз *p-n*-ауысуда жүретін физикалық құбылыстардың ерекшеліктеріне негізделген [7, 8].



1-сурет. Туннельдік диодтың статикалық вольт-амперлік сипаттамасы

Егер энергия көзімен туннельдік диод бір термодинамикалық жүйе деп қарастырсақ, онда жүретін физикалық үдерістер синергетиканың негізгі қағидаларын қанағаттандырады (1, 2-сур.):

- жүйені құраушы элементтер *p*- және *n*-тектес шалаөткізгіштер заряд тасушыларымен алмасады, яғни затпен алмасады;
- диодқа энергия көзі әсер еткенде заряд тасушыларды энергиясы еркін жүру жолы бойында энергия көзі энергиясы есебінен артады. Заряд тасушылар кристалл ақауларымен соқтығысқанда жинаған энергияларын оларға толығымен береді. Нәтижесінде кристалл температурасы өседі. Қызған

кристалл артық жылу энергиясын ортаға береді. Яғни, қарастырылып отырған жүйе ашық, ортамен энергия алмасады.

Туннельдік диодта өз бетімен жүретін құбылыстардың біріне тоқталайық. Туннельдік диодқа кері бағытта кернеу түсірілгенде (2, б-сур.) келесідей үдерістер жүреді:

– *p*-текес шалаөткізгіштің валенттік энергия жолағының төбесі көтеріледі, ал *n*-текес шалаөткізгіштің өткізгіш энергия жолағының түбі төмендейді. Шалаөткізгіштердегі Ферми энергия деңгейлері де өзгереді. *p*-текес шалаөткізгіштің Ферми энергия деңгейі жоғары көтеріледі, ал *n*-текес шалаөткізгіштің Ферми энергия деңгейі төмендейді;

– *p*-текес шалаөткізгіштің валенттік энергия жолағында Ферми энергия деңгейінен төмен орналасқан энергия деңгейлеріндегі электрондар *n*-текес шалаөткізгіштің Ферми энергия жоғары орналасқан бос энергия деңгейлеріне қарсы орналасады (2, б-сур.). Нәтижесінде электрондар *p*-текес шалаөткізгіштен *n*-текес шалаөткізгішке туннельдеп, *n*-текес шалаөткізгіштен *p*-текес шалаөткізгішке қарай бағытталған тоқ пайда болады. Сонымен, жүйеде электрондардың *p*-текес шалаөткізгіштен *n*-текес шалаөткізгішке өтуі түрінде көрінетін өздігінен жүретін үдеріс пайда болады. Өздігінен жүретін үдеріс жүйені құраушы әр текес шалаөткізгіштердің энергия спектрлерінің және сыртқы энергия көзінің түсу ерекшеліктермен анықталады.

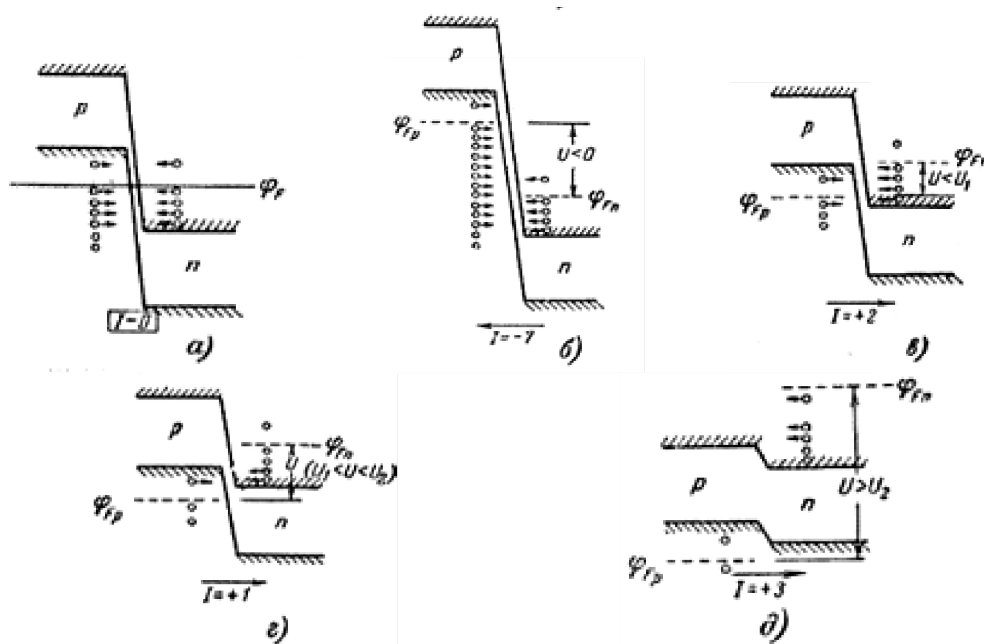
Туннельдік диодқа сыртқы кернеу ($0 < U < U_1$) тура бағытта түсірілсін (2, в-сур.). Сонда келесідей үдерістер жүреді:

– *n*-текес шалаөткізгіштің Ферми энергия деңгейі жоғары көтеріледі, ал *p*-текес шалаөткізгіштің Ферми энергия деңгейі төмендейді;

– *p*-текес шалаөткізгіштің электрондарының біраз бөлігі *n*-текес шалаөткізгіштің рұқсат етілмеген энергия жолағына қарсы орналасады, ал *n*-текес шалаөткізгіштің электрондарының біраз бөлігі *p*-текес шалаөткізгіштің валенттік энергия жолағының бос энергия деңгейлеріне қарсы орналасады. Нәтижесінде электрондар *p*-текес шалаөткізгіштен *n*-текес шалаөткізгішке туннельдемей, керісінше, *n*-текес шалаөткізгіштен *p*-текес шалаөткізгішке туннельдейді, яғни *p*-текес шалаөткізгіштен *n*-текес шалаөткізгішке қарай бағытталған тоқ пайда болады.

Сонымен, жүйеде электрондардың *n*-текес шалаөткізгіштен *p*-текес шалаөткізгішке өтуі түрінде көрінетін өздігінен жүретін үдеріс пайда болады. Яғни, энергия көзімен туннельдік диодтың өзара әсерлесу ерекшелігіне қарай диодта өздігінен жүретін үдерістің жүру бағыты өзгереді.

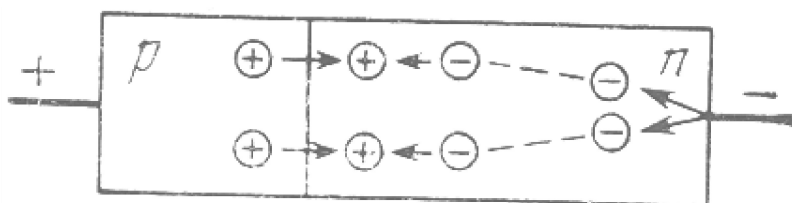
Өздігінен жүретін үдеріс жүйені құраушы әр текес шалаөткізгіштердің энергия спектрлерінің және сыртқы энергия көзінің түсу ерекшеліктермен анықталады.



2-сурет. Сырттан түсірілген потенциал айырымдары әсерінен туннельдік диодтың энергия диаграммасының өзгерістері

Енді қалың p - n -ауысуда жүретін физикалық үдерістердегі синергетика элементтерін талдайық. P - n -ауысу мен оған әсер ететін сыртқы энергия көзін ашық және термодинамикалық орнықсыз жүйе, синергетика элементтерінің пайда болуына әкелетін барлық шарттарға қанағаттандыратын жүйе деп қарастыруға болады. Егер сыртқы энергия көз p - n -ауысуға тура бағытта түсірілсе, келесідей үдерістер жүреді:

- потенциалық тосқауылдың биіктігі төмендейді;
- n -тектес шалаөткізгіштен p -тектес шалаөткізгішке электрондар, ал p -тектес шалаөткізгіштен n -тектес шалаөткізгішке кемтіктер қосымша диффузиялайды, яғни бір шалаөткізгіштен екінші шалаөткізгішке негізгі заряд тасушылардың өтуі түрінде көрінетін өздігінен жүретін үдерістер пайда болады;
- негізгі заряд тасушылардың диффузиясы шалаөткізгіштердің ауысумен іргелес қабаттарында қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежелерін арттырады $n(x) > n_p$ және $p(x) > p_n$ (сыртқы потенциал айырымын тура бағытта түсіргенде шалаөткізгіштердің ауысумен жапсарлас қабаттарында қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежелерінің өсуін инжекция құбылысы дейді). $n(x)$, $p(x)$ — шалаөткізгіштердің ауысумен жапсарлас қабаттарындағы қосалқы заряд тасушылардың инжекция құбылысы кезіндегі шоғырлану дәрежелері, n_p , p_n -шалаөткізгіштердің терең қабаттарындағы қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежелері;
- инжекция құбылысының әсерінен шалаөткізгіштердің қабаттарында қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежесінің градиенті пайда болып, шалаөткізгіштердің қалың қабаттарына қарай бағытталған диффузия тоқтары пайда болады, яғни қосалқы заряд тасушылар шалаөткізгіштердің қалың қабаттарына қарай тасылады. Басқаша айтқанда, заряд тасушылардың өзбеттерімен бағытталған қозғалыстары орын алады;
- инжекциялаған артық қосалқы тасушылар шалаөткізгіштердің ауысумен жапсарлас қабаттарының электр бейтараптығын бұзады (3-сур.);
- бұзылған электр бейтараптығын қалпына келтіру үшін бейтараптығы бұзылған өңірге сыртқы тізбектен негізгі заряд тасушылар ағылып келеді. Басқаша айтқанда, негізгі заряд тасушылардың ығу тоғы ретінде тіркелетін бағытталаған қозғалысы өз бетімен пайда болады.



3-сурет. Инжекция құбылысы кезінде қосалқы заряд тасушылардың әсерінен ығу тоғының пайда болуы

Егер p - n -ауысуға түсірілген сыртқы энергия көзі тура бағыттан кері бағытқа ауыстырылса (n -тектес шалаөткізгішке энергия көзінің оң үйегі, p -тектес шалаөткізгішке теріс үйегі жалғанса), ауысуға түсірілген потенциалдың оң үйегі теріс үйегімен айырбасталады.

Сол кезде қандай құбылыстар жүретінін қарастырайық. Жоғарыда потенциал тура бағытта түсірілгенде, шалаөткізгіштердің ауысуы мен жапсарлас қабаттарында, қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежелерінің күрт өсетіндігін, инжекция құбылысы орын алатындығын айтылды.

Сыртқы потенциал тура бағыттан кері бағытқа ауыстырылғанда, келесідей үдерістер жүреді:

- қалыңдықтары диффузия ұзындықтарына тең, ауысу мен жапсарлас қабаттарда орналасқан, электрондар мен кемтіктер ауысудың электр өрісіне түсетін болса, олар ішкі өрістің әсерінен үдетіліп, шалаөткізгіштердің қалың қабаттарына қарай лақтырады, яғни қосалқы заряд тасушылардың артық сандары кері қайта бастайды. Бұл құбылысты экстракция деп атайды.

Сонымен, экстракция құбылысы инжекция құбылысына қарама-қарсы.

P - n -ауысуға негізделген шалаөткізгіштен жасалған құралдардың жұмысы, осы экстракция және инжекция құбылысына негізделген.

Келесідей қорытынды жасауға болады:

- p - n -ауысу тоғысқан немесе тоғыспаған шалаөткізгіштерден жасалса, онда өз бетімен жүретін үдерістер әртүрлі;
- тоғысқан шалаөткізгіштерден жасалған диодтарды – туннельдік диодтарда энергия спектрінің ерекшелігіне қарай, келесідей өздігімен жүретін үдерістер пайда болады;

– диодка сыртқы потенциал айырымы кері бағытта түсірілсе, онда электрондар p -тектеc шалаөткізгіштен n -тектеc шалаөткізгішке өз бетімен көше бастайды. Нәтижесінде, туннельдік диодтың вольт-амперлік сипаттамасындағы кері тоғы шама жағынан өзгереді;

– диодка сыртқы потенциал тура бағытта түсірілгенде, өздігімен жүретін үдеріс жүру бағытын өзгертеді, яғни электрондар n -тектеc шалаөткізгіштен p -тектеc шалаөткізгішке қарай өте бастайды.

Тура бағытта түсірілген потенциал айырымының шамасын өсіргенде, өздігінен жүретін үдерістің қарқыны төмендеп, сыртқы потенциал айырымының белгілі бір шамасында нөлге дейін азаяды (өздігімен жүретін кері үдерістің қарқынының нөлдік мәніне, p -тектеc шалаөткізгіштің валенттік энергия жолағының төбесі, n -тектеc шалаөткізгіштің өткізгіш энергия жолағының түбіне сәйкес келеді).

Тура бағытта түсірілген потенциал айырымын әрі қарай өсіргенде, потенциал ауысудың биіктігі төмендеп, негізгі заряд тасушылар бір шалаөткізгіштен екінші шалаөткізгішке өз бетімен өте бастайды — диффузиялайды. Яғни, тағы да электрондар n -тектеc шалаөткізгіштен p -тектеc шалаөткізгішке, кемтіктер p -тектеc шалаөткізгіштен n -тектеc шалаөткізгішке өз беттерімен өте бастайды. Өздігінен жүретін үдерістер пайда болады.

Егер диод тоғыспаған шалаөткізгіштерден жасалса және оны сыртқы энергия көзімен қосылған бір термодинамикалық жүйе деп қарастырсақ, онда келесідей өздігімен жүретін үдерістер пайда болады.

Егер сыртқы энергия көзі ауысуға тура бағытта түсірілсе, онда инъекция құбылысы әсерінен шалаөткізгіштердің ауысуымен іргелес қабаттарында:

– қосалқы заряд тасушылардың шоғырлану дәрежесі артуы нәтижесінде, олардың шоғырлану дәрежелерінің градиенттері диффузия тоғын тудырады. Нәтижесінде, қосалқы заряд тасушылар, шалаөткізгіштердің терең қабаттарына қарай өз бетімен тасыла бастайды. Яғни, өздігінен тасымалдау құбылысы пайда болады;

– инъекцияланған қосалқы заряд тасушылардың әсерінен шалаөткізгіштердің ауысуымен іргелес қабаттарында электр бейтараптық бұзылады. Шалаөткізгіш өңірінің бейтараптығын қалпына келтіру үшін сыртқы электр тізбегінен негізгі заряд тасушылар ағылып келе бастайды. Қосалқы заряд тасушылардың электр өрісінің әсерінен өз бетімен жүретін ығу тоғы пайда болады.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Хакен Г. Синергетика / Г.Хакен. — М.: Мир, 2000. — 404 с.
- 2 Шелль Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами / Э.Шелль. — М.: Мир, 1991. — С. 8–28.
- 3 Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел / Р. Бьюб. — М.: Изд-во ИЛ, 1966. — 70–83 с.
- 4 Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках / С.М. Рывкин // УФН. — 1963. — Т. XI. — Вып. 2. — С. 45–47.
- 5 Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; под ред. В.А. Лабунцова. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
- 6 Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К.Чиркин. — М.: Высш. шк., 2006. — 479 с.
- 7 Усыченко В.Г. Самоорганизация электронов в электронных приборах / В.Г. Усыченко // ЖТФ. — 2004. — Т. 74. — Вып. 11. — С. 38–46.
- 8 Chirkova L.V. Physical processes in the Gann diode and the energy balans / L.V. Chirkova, K.T. Yermaganbetov, E.V. Skubnevsky, K.M. Makhanov, Ye.T. Arinova, A. Omirbek // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2017. — № 1. — P. 15–21.

К.Т. Ермағанбетов, Л.В. Чиркова, А.Н. Курмаш, Г.И. Мусина

Элементы синергетики в физических процессах в p - n -переходе

Современный этап развития науки характеризуется стремительным ростом научной информации. При этом наблюдается усиление интеграционных процессов различных разделов фундаментальной науки. Одним из важнейших научных достижений последнего времени можно считать понимание роли неустойчивых, критических состояний в эволюции материи. Сегодня акцент переносится с изучения равновесных состояний системы на исследование состояний неустойчивости, механизмов возникновения нового, рождения и перестройки структур, самоорганизации. Таким образом, можно говорить о фор-

мировании новой научной парадигмы. Самоорганизация сопровождается процессами возникновения макроскопических упорядоченных пространственно-временных структур в сложных нелинейных системах. При этом последние должны находиться в состояниях, далеких от равновесия вблизи точек бифуркации, в окрестностях которых поведение системы становится неустойчивым. Возникновение таких структур возможно в термодинамически открытых, т.е. обменивающихся веществом или энергией с окружающей средой, системах, которые описываются нелинейными динамическими уравнениями. Кроме того, отклонение таких систем от состояния равновесия должно превышать некоторое критическое значение. Полупроводниковый прибор и внешний источник питания составляют своеобразную термодинамическую систему, которая также может находиться в неравновесном состоянии. Естественно, что в такой системе должны возникать самоорганизующиеся процессы. В целом работа большинства полупроводниковых приборов основана на самоорганизующихся процессах, возникающих в таких системах. Поэтому изучение процессов самоорганизации в полупроводниковых приборах является важной задачей. В работе описаны механизмы возникновения, процессы самоорганизации в одном из важнейших объектов, так называемых p-n перехода.

Ключевые слова: синергетика, термодинамика, энергетические диаграммы, туннельный диод.

K.T. Ermaganbetov, L.V. Chirkova, A.N. Kurmash, G.I. Musina

Synergetics elements in physical processes in p-n-transition

The present stage of development of science is characterized by rapid growth of scientific information. At the same time strengthening of integration processes of various sections of fundamental science is observed. One of the most important scientific achievements of the last time can consider understanding of a role of unstable, critical conditions in matter evolution. Today the accent is transferred from studying of equilibrium conditions of system to a research of conditions of instability, mechanisms of emergence new, the births and reorganizations of structures, self-organization. Thus, it is possible to speak about formation of a new scientific paradigm. Self-organization is followed by processes of emergence of macroscopic ordered existential structures in difficult nonlinear systems. At the same time the last have to be in the states far from balance near bifurcation points in the neighborhood of which the behavior of system becomes unstable. Emergence of such structures is possible in thermodynamic opened, i.e. exchanging substance or energy with the environment, systems which are described by the nonlinear dynamic equations. Besides, the deviation of such systems from equilibrium state has to exceed some critical value. The semiconductor device and the external power supply make a peculiar thermodynamic system which can also be in a nonequilibrium state. It is natural that in such system there have to be self-organized processes. In general work of the majority of semiconductor devices is based on the self-organized processes arising in such systems. Therefore, studying of processes of self-organization in semiconductor devices is an important task. In work mechanisms emergence, processes of self-organization in one of the major objects, so-called p-n of transition are described.

Keywords: synergetics, thermodynamics, energy diagrams, tunnel diode.

References

- 1 Haken, G. (2000). *Synerhetika [Synergetics]*. Moscow: Mir [in Russian].
- 2 Schell, E. (1991). *Samoorganizatsiia v poluprovodnikakh. Neravnovesnye fazovye perekhody v poluprovodnikakh, obuslovlennye heneratsionno-rekombinatsionnymi protsessami [Self-organization in semiconductors. Nonequilibrium phase transitions in semiconductors due to generation-recombination processes]*. Moscow: Mir [in Russian].
- 3 Bubef, R. (1966). *Fotoprovodimost tverdykh tel [Photoconductivity of solids]*. Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury [in Russian].
- 4 Ryvkin, S.M. (1963). Fotoelektrichetskie yavleniia v poluprovodnikakh [Photoelectric phenomena in semiconductors]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 11, 45–47 [in Russian].
- 5 Tugov, N.M., Glebov, B.A., & Charykov, N.A. (1990). *Poluprovodnikovye pribory [Semiconductor Devices]*. V.A. Labuntsov (Ed.). Moscow: Enerhoatomizdat [in Russian].
- 6 Pasyukov, V.V., & Chirkin, L.K. (2006). *Poluprovodnikovye pribory [Semiconductor Devices]*. Moscow: Vysshiaia shkola [in Russian].
- 7 Usyuchenko, V.G. (2004). Samoorganizatsiia elektronov v elektronnykh priborakh [Self-organization of electrons in electronic devices]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Journal of Technical Physics*, Vol. 74, 11, 38–46 [in Russian].
- 8 Chirkova, L.V., Yermaganbetov, K.T., Skubnevsky, E.V., Makhanov, K.M., Arinova, Ye.T., & Omirbek, A. (2017). Physical processes in the Gann diode and the energy balans. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, 1, 15–21.