

А. Курмаш, К.Т. Ермаганбетов, Л.В. Чиркова
Карагандинский государственный университет имени академика Е.А. Букетова, г.
Караганда, Республика Казахстан, ket3853@mail.ru

Самоорганизация электронов в полупроводниковых приборах

К неравновесным термодинамическим системам относятся открытые макроскопические системы, обладающие большим числом микроскопических степеней свободы. Под действием внешних сил и вследствие имеющихся нелинейностей такие системы могут самопроизвольно переходить в состояние с высокоупорядоченными пространственными или временными структурами. Подобные структуры называются диссипативными, так как они возникают и поддерживаются при непрерывном притоке и диссипации энергии.

Замкнутые, изолированные системы после окончания воздействия внешнего возмущения всегда возвращаются в состояние теплового равновесия, обладающее максимальной энтропией. В открытой неравновесной нелинейной термодинамической системе под действием внешнего возмущения могут развиваться процессы самоорганизации, в результате которых энтропия системы локально уменьшается. Эти процессы связаны с качественными изменениями в состоянии системы, возникающими, например, вследствие фазовых переходов в равновесных системах.

Теория неравновесных термодинамических систем развивается в двух направлениях [1-4]. Первое связано с развитием теоретических основ на основе использования систем нелинейных дифференциальных уравнений (теория бифуркаций, теория динамических систем, теория катастроф, теория солитонов, теория хаоса и др.). Второе – основано на выявлении и подборе наиболее подходящих физических величин и наблюдаемых параметров, пригодных для описания состояния неравновесных систем.

Многие полупроводниковые приборы работают в режиме управляемых электрических неустойчивостей, которые вызывают осцилляцию тока, напряжения или переходы между проводящими и непроводящими состояниями. Т.е., эти неустойчивости можно рассматривать как неравновесные фазовые переходы в сильно неравновесной термодинамической системе.

Если на полупроводник действует сильное внешнее возмущение – сильные электрическое и магнитное поля, сильное световое поле, интенсивная инжекция неосновных носителей заряда - в нем могут возникать неустойчивости как, например, токовый пробой, колебания и скачки токов и напряжений, гистерезис вольт – амперной характеристики и др.

При больших отклонениях от равновесия в однородно легированных полупроводниковых образцах возникают области сильного (или слабого) электрического поля, называемые *электрическими доменами* [2]. Свойства этих областей в значительной степени отличаются от свойств остальной части образца.

Домены могут быть подвижными и неподвижными (статическими). Статические домены могут располагаться вблизи контактов или неоднородностей полупроводникового образца. Движение доменов сильного поля происходит в том направлении, куда движутся основные носители заряда. Скорость движения доменов постоянна. Движущиеся домены приводят к возникновению колебаний тока. Они обусловлены исчезновением доменов в одних контактах и возникновением в других. Если времена исчезновения и появления колебаний тока малы по сравнению со временем прохождения колебаний по образцу, то период колебаний определяется отношением длины образца к скорости переноса домена.

В результате сильного отклонения от равновесия однородное распределение поля может стать неустойчивым и система перейдет в другое, резко неоднородное состояние. Это ситуация напоминает в определенном смысле фазовый переход. Переход в неоднородное состояние происходит скачком при определенных параметрах внешнего возмущения.

Интерес к исследованию электрических (доменных) неустойчивостей в полупроводниках и полупроводниковых структурах, наблюдаемый в настоящее время, во многом объясняется следующими обстоятельствами [2,3,5].

Во-первых, эти исследования открывают принципиально новый и достаточно простой способ преобразования электромагнитной энергии с помощью полупроводников, не содержащих ни электронно-дырочных переходов, ни каких-либо других искусственно созданных макроскопических неоднородностей. С этой точки зрения важное значение имеют полупроводники, где возможно появление подвижных и неподвижных (статичных) электрических неустойчивостей, приводящих к нелинейной вольт-амперной характеристике. В таких средах, в зависимости от условий эксперимента, возможны генерация и усиление электромагнитных колебаний, стабилизация тока и т.д. Соответственно, будет значительно прикладное значение таких полупроводников. Особый интерес в этой связи представляет исследование доменной неустойчивости в арсениде галлия, связанной с особенностями его энергетического спектра.

Во-вторых, возникновение электрических неустойчивостей в полупроводниках может быть связано либо со своеобразием энергетического спектра носителей заряда (как в случае арсенида галлия), либо с особенностями процессов захвата и генерации носителей заряда в них, либо со спецификой обмена энергией между различными степенями свободы твердого тела. В связи с этим исследование электрических неустойчивостей в полупроводниках представляет особый интерес для физики твердого тела.

Далее. Полупроводники могут рассматриваться как существенно неравновесные макроскопические термодинамические системы. Поэтому результаты, полученные при исследовании электрических неустойчивостей в полупроводниках, по-видимому, должны носить более общий характер, а не ограничиваться только этой областью науки.

Как уже отмечалось, домены могут быть подвижными и неподвижными (статические). Подвижные домены могут привести к колебаниям тока в образце.

Под действием сильного поля в полупроводниках возможно также возникновение токовых шнуров, плотность тока внутри которого существенно отличается от плотности тока в остальной части образца.

В условиях, близких к состоянию термодинамического равновесия, распределение напряженности поля в макроскопическом однородном образце само является пространственно однородным. При значительном отклонении от состояния равновесия однородное распределение поля может стать неустойчивым и система может перейти в другое, резко неоднородное состояние. Это явление в определенном смысле напоминает фазовый переход - переход в неоднородное состояние происходит скачком при некоторых значениях параметров (напряженности электрического поля, интенсивности светового потока и т.д.).

Именно образованием статических доменов было впервые объяснено появление падающего участка на вольт-амперной характеристике однородного образца. Далее было высказано предположение, что возникновение отрицательной дифференциальной проводимости связано с флуктуационной неустойчивостью пространственно однородного распределения электрического поля и заряда. Стационарное движение доменов впервые было объяснено нелинейностью. Этим же феноменом были объяснены колебания тока в германии, легированном атомами золота.

Для исследования распределения поля и заряда в образце при нарушении равновесия в нем как правило, используют зависимость плотности тока от напряжения, т.е. вольтамперную характеристику.

В нелинейной среде вольтамперная характеристика определяется тензором дифференциальной проводимости

$$\sigma_{\alpha\beta} = dj_{\alpha}/dE_{\beta}, \quad (1)$$

где

α, β – принимают значения x, y, z .

В пространственно однородной системе выражение (1) принимает скалярный вид

$$\sigma = dj/dE, \quad (2)$$

т.е. векторы j и E коллинеарны.

Дифференциальная проводимость в определенном интервале значений напряженности E принимает отрицательное значение. Это обусловлено тем, что при возникновении колебаний тока в цепи часть энергии, поставляемой источником постоянного тока, трансформируется в энергию электромагнитных волн [2].

Заметим, что изменение знака дифференциальной проводимости в пространственно однородной системе может привести не прямо к незатухающим колебаниям тока, а к изменению состояния системы – образованию доменов. Колебания тока при этом возникают в результате движения доменов.

На рисунке 1 показана зависимость плотности тока j от напряженности поля в пространственной системе координат. Как видно из рисунка, на вольт – амперной характеристике имеется участок с отрицательным сопротивлением.

Из рисунка 1, а следует, что в определенной области значений тока $j_v < j < j_p$ напряженность поля является многозначной функцией плотности тока. При заданном значении тока в указанном интервале система может находиться в одном из трех пространственно однородных состояний, в двух из которых (при E_1 и E_3) дифференциальная проводимость положительна, а в третьем (при E_2) – отрицательна. Такую вольт - амперную характеристику называют характеристикой N - типа. На вольт – амперных характеристиках N - типа дифференциальная проводимость меняет знак, принимая нулевые значения в точках ($E = E_p, j = j_p$) и ($E = E_v, j = j_v$).

Как следует из рисунка 1, б, в случае S -образной вольт- амперной характеристики плотность тока j является неоднозначной функцией напряженности электрического поля E . Дифференциальная проводимость меняет знак, обращаясь в бесконечность, в точках ($E = E_p, j = j_p$) и ($E = E_v, j = j_v$).

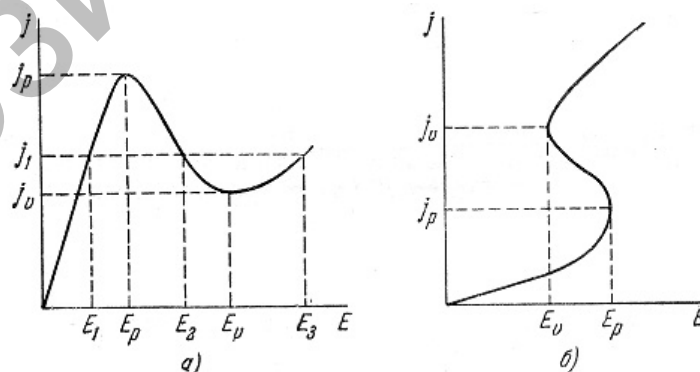


Рисунок 1. Вольт – амперные характеристики а) N - типа, б) S - типа

В изотропной пространственно однородной системе с униполярной проводимостью вектор плотности тока связан с вектором плотности напряженности поля соотношением:

$$\mathbf{j} = qn\mu\mathbf{E}, \quad (3)$$

где q – заряд, n и μ – концентрация и подвижность носителей заряда.

Концентрация и подвижность носителей заряда вообще зависят от напряженности электрического поля. Тогда, используя выражение (3), из (2) получим:

$$\sigma = qn\mu(1 + d\ln\mu/d\ln E + d\ln n/d\ln E). \quad (4)$$

Из последнего выражения следует, что для того, чтобы удельная проводимость принимала отрицательные значения, необходимо, чтобы наблюдалось резкое уменьшение с ростом напряженности электрического поля либо подвижности, либо концентрации носителей заряда, либо и того, и другого. В соответствии с этим выделяют два основных механизма, приводящих к отрицательной удельной проводимости: *дрейфовую нелинейность*, определяемую зависимостью подвижности носителей заряда от электрического поля $\mu = \mu(E)$, и *концентрационную нелинейность*, которая обусловлена зависимостью концентрации носителей заряда от электрического поля $n = n(E)$.

Полевые зависимости подвижности и концентрации носителей заряда вызываются влиянием следующих факторов.

Прежде всего, нагревом электронного газа в электрическом поле. Из-за того, что массы электронов (дырок) много меньше массы атомов, образующих кристалл, обмен энергией между электронами (дырками) и решеткой происходит значительно медленнее, чем обмен импульсом. Поэтому средняя энергия электронов (дырок) в сильном электрическом поле может заметно отличаться от энергии, характерной для них в состоянии термодинамического равновесия. В результате электронный газ в сильном электрическом поле нагревается.

К зависимости подвижности, коэффициента диффузии, концентрации свободных носителей заряда от напряженности электрического поля приводит изменение усредненных характеристик носителей заряда, таких, как подвижность, рекомбинационное время, скорость ионизации и т.д., из-за зависимости распределения носителей заряда по энергиям от вероятностей индивидуальных актов рассеяния носителей на рассеивающих центрах.

Существенную роль играют особенности энергетического спектра носителей заряда в полупроводниках.

К зависимости концентрации носителей заряда от напряженности электрического поля может приводить также перераспределение электронов между зоной проводимости и связанными состояниями при разогреве электронного газа. Усредненная вероятность переходов электронов на ловушки и обратно зависит от вида функции распределения электронов в зоне проводимости. А усреднение проводится с использованием неравновесной функции распределения, которая и зависит от напряженности электрического поля.

Далее, неустойчивость, называемая *перегревной*, может быть связана с особенностями зависимости времен рассеяния энергии и импульса от средней энергии носителей заряда. При этом изменение характера рассеяния энергии и импульса основной части носителей заряда может привести к изменению поведения системы горячих электронов – к изменению ВАХ. (Выше рассмотренные механизмы, приводящие к появлению падающего участка на вольт-амперной характеристике связаны с особенностью энергетического спектра носителей заряда. Действительно, возникновение ОДП было связано с переходом части электронов в особые состояния. Например, на локальные уровни или в те области энергетического спектра, где велики эффективные массы носителей).

Изменение формы вольт-амперной характеристики возможно также из-за разогрева решетки за счет джоулева тепла. Повышение температуры кристалла при разогреве его в электрическом поле вызывает уменьшение концентрации неравновесных носителей заряда, генерируемых при освещении образца, что приводит к ОДП. (До сих пор описывались случаи, когда под действием электрического поля существенно нарушалось равновесие в системе носителей заряда, а разогрев решетки не учитывался)

В современной электронике успешно применяются неупорядоченные полупроводниковые материалы, что обуславливает необходимость исследования пространственно-распределенных систем, в которых развиваются процессы самоорганизации.

Анализ физических механизмов возникновения нелинейных процессов (ударной ионизации, нелинейной рекомбинации, полевого разогрева носителей заряда, перехода носителей заряда с одного энергетического минимума к другому энергетическому минимуму с изменением эффективной массы носителей заряда), лежащих в основе функционирования тех или иных полупроводниковых приборов, и методов управления ими представляет особый интерес для углубленного понимания физических принципов их работы.

В качестве примера рассмотрим туннельный диод, находящийся под обратным смещением. Действие туннельного диода основано на прохождении свободных носителей заряда (электронов) сквозь узкий потенциальный барьер благодаря квантовомеханическому процессу туннелирования носителей заряда. Поскольку вероятность туннельного просачивания электронов через барьер в значительной мере определяется шириной области пространственного заряда в $p-n$ -переходе, туннельный диод изготавливают на основе вырожденных полупроводников (с концентрацией примесей до 10^{25} - 10^{27} м⁻³). В них уровни примесных атомов образуют энергетическую зону, сливающуюся с основными разрешенными зонами (валентной и зоной проводимости). В результате уровни Ферми располагаются не в запрещенных зонах n - и p - типов полупроводников, а в разрешенных зонах: в валентной зоне слоя p и в зоне проводимости слоя n . Следствием высокой концентрации примесей в прилегающих к $p-n$ – переходу областях является малая толщина перехода в туннельном диоде (около 10^{-2} мкм). Сквозь такие тонкие потенциальные барьеры возможно туннелирование носителей заряда [6,7].

Если рассматривать систему, состоящую из источника энергии и туннельного диода, то физические процессы, происходящие в такой системе, будут удовлетворять основным принципам синергетики:

- когда между элементами системы отсутствует взаимодействие, т.е. когда на диод не действует источник энергии, потоки электронов через $p-n$ - переход уравниваются и ток через переход отсутствует. Таким образом, элементы рассматриваемой системы (полупроводники n - и p - типов) обмениваются веществом (одинаковыми количествами электронов);

- когда на диод действует источник энергии, носители заряда на длине свободного пробега накапливают избыточную энергию за счет энергии источника и при столкновениях с неидеальностями кристалла передают накопленную энергию кристаллу. В результате кристалл нагревается. Нагретый кристалл отдает тепловую энергию окружающей среде. Т.е. рассматриваемая система является открытой и находится в термодинамическом неравновесном состоянии.

Когда к туннельному диоду прикладывается обратное смещение, происходит следующее:

- электроны валентной зоны полупроводника p -типа, находящиеся на энергетических уровнях ниже уровня Ферми φ_{F_p} , располагаются напротив свободных энергетических уровней полупроводника n -типа, лежащих выше уровня Ферми φ_{F_n} . В результате этого возникает ток через переход, направленный от полупроводника n -типа к полупроводнику p -типа.

Таким образом, в системе происходит самоорганизация процессов в виде направленного переноса электронов от полупроводника p -типа к полупроводнику n -типа. Перенос заряда происходит путем туннелирования. Самоорганизация становится возможной за счет особенностей взаимодействия между элементами системы и их характеристик. Направление самосогласованного процесса определяется особенностями свойств взаимодействующих

элементов системы и природой взаимодействия между ними. В рассматриваемом случае, направление самосогласованного процесса определяется особенностями энергетической структуры двух полупроводников и направлениями поля внешнего источника энергии и внутреннего поля перехода.

Литературы:

1. Шелль Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами: Пер. с англ. – Мир, 1991. – 464 с. ил.
2. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, А. Г. Миронов. Гл. ред. физ.-мат.лит. Изд-во «Наука», 1972 г.
3. Хакен Г. Синергетика. – М.:Мир, 2000. 404 с.
4. Усыченко В. Г. Электронная синергетика. Физические основы саморганизации и эволюции материи: Курс лекций, - СПб.: «Издательство Лань», 2010. – 240 с
5. Николис Н., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. – М.: Мир, 2007. 96 с.
6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. радио, 1980.– 296 с.
7. Пасынков В. В., Чиркин Л. В. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов – Высш. шк., 1987. – 479 с.

А.Н.Құрмаш

*Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті, Қарағанды, Қазақстан,
E-mail:altynay.kurmash@mail.ru*

Р-п ауысуда жүретін физикалық үдерістердегі синергетика элементтері

Қазіргі заманғы электроника элементтерін жасау үшін, алдымен шалаөткізгіштерде өздігінен жүретін үдерістерді зерттеу қажет. Шалаөткізгіштен жасалған құралдарда жүретін физикалық үдерістердегі синергетика элементтерін зерттеудің қажеттілігі, біріншіден, шалаөткізгіштен жасалған құралдардың көпшілігінің негізінде синергетика ұстанымдары жатады. Екіншіден, шалаөткізгіштер және олардан жасалған құралдар синергетика заңдылықтарын зерттеуге мүмкіндік беретін ерекше орта. Синергетика заңдылықтарының дұрыс, бұрыстығын тәжірибе жүзінде анықтауға мүмкіндік беретін, бірден - бір қолайлы орта шалаөткізгіштер және олардан жасалған құралдар болып табылады.

Шалаөткізгіштерден жасалған құралдар электрлік тұрақсыздықтар пайда болатын күрделі динамикалық жүйе болып табылады. Электрлік тұрақсыздықтарға токтың тұрақсыздығы, кездейсоқ ток пен кернеудің ауытқуы тағы басқалар жатады. Шалаөткізгіштердегі электрлік тұрақсыздықтар сыртқы электр өрісінің әсерінен, қосалқы заряд тасушылардың инжекциялауы әсерінен, сыртқы фотондар өрісінің әсерінен тағысын тағы басқалай пайда болуы мүмкін. Термодинамикалық жүйеде өздігінен жүретін үдерістер пайда болу үшін жүйе тепе-теңдік күйінен шығарылған, ашық-сыртқы ортамен, энергиямен, ақпараттармен алмасу мүмкіндіктері бар болу керек.

Шалаөткізгіштен жасалған құралдардың жұмыс ұстанымдарының негізінде жататын бейсызық үдерістердің (соқтығысу арқылы иондалу, бейсызық рекомбинация, заряд тасушылардың энергиясының электр өрісінің әсерінен артуы, заряд тасушылардың энергия спектрінің бір минимумнан екінші минимумына көшу кезінде, олардың эффектив массаларының өзгерісі т.т.с) физикалық негіздерін зерттеудің маңызы ерекше. Себебі, бейсызық үдерістердің ерекшеліктеріне сүйеніп, жаңа шалаөткізгіш құралдарын жасауға болады.