

# МЕХАНИЗМ P-N-КОМПЛЕМЕНТАРНОЙ (ПРАМЕТРИЧЕСКОЙ) КОМПЕНСАЦИИ РАБОТЫ ВЫХОДА (ФЕНОМЕН P-N СТРУКТУРЫ)

В. А. Поляков,

Научно-исследовательский институт радиоприборостроения, Москва

Твердотельный диод есть не просто определенным образом легированный полупроводниковый кристалл с нелинейными электрическими (вентильными) свойствами — двухполосник, как его интерпретирует «Физика твердого тела». Это структура функционально замкнутого с «выхода» на «вход» активного (p-n) четырехполосника с феноменальной крутизной прямой передачи, величина которой  $S_e = I_e q / kT$  определяется только мощностью внешней цепи (потоком  $I_e$ ) и известными физическими константами  $k$ ,  $T$  и  $q$ . При определенном стечении обстоятельств (дополнительный экстрагирующий p-n переходной слой, например) такой внутренний «четырёхполосник» может быть разомкнутым и функционировать как эффективный усилитель мощности, например, биполярный транзистор. Очевидно, свойство усиления «внутреннего» p-n-четырёхполосника не является признаком конструкции и относится к случаю закономерных природных явлений и, следовательно, в том или ином виде может проявляться в других, подобных электронно-дырочному переходу образованиях.

«Теперь уже недостаточно открыть основные законы и понять, как работает мир «в принципе». Все более и более важным становится выяснение того, каким способом эти принципы проявляют себя в реальности.... Это не означает, что известные до сих пор законы природы неверны; это лишь означает, что трудно обнаружить всё скрытое в них» [1].

Очевидно, тема выбора парадигмы в описании принципа действия электронно-дырочного (p-n) перехода как основы биполярного транзистора устарела более чем на полвека. Но, в свое время «вышедшая из отходов физики» [2] твердого тела (ФТТ), теория биполярного транзистора (p-n перехода) при отсутствии иных мотивов объективно формализовалась в экспериментально-теоретической среде уже сложившихся представлений. Тем самым, вопрос принципа действия p-n перехода как тривиального двухполосника был закрыт навсегда [3]. Но случилось то, что сама сущность p-n перехода и целый пласт качественно новых представлений относительно принципа действия структур такого типа оказались утраченными.

Суть в том, что с наступлением эры ядерных исследований в Элек-

тронике [4], при изучении, в частности, предельных необратимых изменений параметров, характеризующих усилительные свойства биполярных транзисторов в зависимости от суммарного потока проникающих излучений ( $\Sigma\Phi$ ), крепко убеждение, что тайна «черного ящика» p-n переходного слоя далеко не исчерпывается известными количественными соотношениями, а описание принципа действия есть только «легенда» к его математической модели [5].

Можно было прийти к пониманию того, вообще говоря, прогнозируемого обстоятельства, что усиление мощности возникает, как принято думать, не в коллекторе биполярного транзистора (сокращенное от *transfer resistor* [2]), а в его эмиттере [6]. Другими словами, отдельно взятый электронно-дырочный (p-n) переход предположительно есть не просто двухполосник из полупроводникового материала с нелинейными (вентильными) свойствами, но является структурой активной [7].

Сложилась ситуация, располагающая к более внимательной оценке и соответствующей интерпретации накопленных в теории и практике фактов относительно содержимого «черного ящика» p-n переходного слоя.

## Переходной слой (ОПЗ или поверхностный потенциальный барьер?)

«Другими словами на границе твердого тела с вакуумом имеется некоторый энергетический барьер, препятствующий самопроизвольному выходу электронов из кристалла» [8].

Так вышло исторически, и не было сомнений в том, что потенциальный барьер есть порождение именно p-n-структуры в ее классическом, экспериментально-теоретическом, монокристалльном исполнении со всеми вытекающими последствиями. Или это был только частный случай известного явления поверхностного энергетического барьера твердых тел ( $\Delta\phi$ ) при  $T > 0$  [9]?

«На поверхности кристалла граничные атомы имеют незавершенные химические связи, т. е. они могут воспринимать электроны. Это значит, что поверхностные атомы основного кристалла ведут себя иначе, чем атомы в его объеме.... как и при всяком нарушении периодичности, в этом случае должны возникать локальные уровни внутри запрещенной зоны полупроводника.... Отличительной чертой этих уровней является их локализация не только по энергии, но и локализация в пространстве — они сосредоточены лишь на самой поверхности раздела полупроводника с вакуумом или газом. Такие поверхностные уровни носят название таммовских уровней» [10, с. 48]. То есть, внешние таммовские (разрешенные в вакууме) уровни заполняются кинетическими тепловыми носителями заряда, если из бесконечного теоретически идеального [11] кристалла, скажем, невырожденного полупроводника n-типа выделить блок конечной величины. Идеализация предполагает соизмеримость диффузионной длины неосновных носителей с размерами такого блока или ничтожность генерационно-рекомбинационного фактора.

• Очевидно, пограничный потенциальный барьер есть следствие накапливаемой материальной средой (кристаллом) волновой энергии окружающего пространства (температуры), позволяющее говорить о тепловом фоне.

Пересекая границу тела с вакуумом, тепловые носители заряда проводимости оставляют на атомарно чистой поверхности некомпенсированным индуцированным тормозящим заряд слоя ионов кристаллической решетки шириной  $L$ . Возникает приповерхностный скачок потенциалов  $\Delta\varphi$  (двойной электрический слой, электронная атмосфера [8, 12]).

Тепловой энергетический барьер «препятствует выходу», т. е. является запирающим, важно отметить, для «своих» собственных носителей заряда и интересен тем, что представляет собой авторегулирующуюся по температуре систему. Он уравнивает значительную силу давления «электронного газа» и сам является силой — силой межатомных связей.

• Другими словами, с точки зрения зонной модели можно было бы сказать, что атомы на внешнем срезе кристалла раскрываются («объедаются») в вакуум (иную прозрачную для подвижных носителей заряда среду) своей зоной проводимости — межатомными связями со всей своей энергетикой и механизмами. В этом смысле «электронная атмосфера» [12, с. 40] (далее кокон) покидающих блок кинетических носителей на абсолютно чистой «таммовской» поверхности существует не произвольно, а подчиняется волновым законам, подобным орбитальным, и вероятно может быть представлена как паттерн приповерхностных стоячих волн. То есть относительно совокупности (среза) приповерхностных атомов «кокон» организован аналогично атомной оболочке внутри нейтральной части кристалла. Образно говоря, объемная «губчатая» волновая структура зоны проводимости объединяется на срезе кристалла в запаасающий энергию теплового фона «кокон», модифицируясь в мощную приповерхностную волновую структуру потенциального барьера. Объем кристалла нейтрален, поскольку заряды внутренних ионизируемых атомов и «далее ткани» «почти свободных» [2] носителей проводимости с концентрацией  $n_0$  динамически компенсированы [11].

В кристаллах с металлическими свойствами с избыточной ионизацией, ширина обеднения ионного слоя соизмерима с шагом решетки ( $L \approx a$ ). Если же таким телом, например, является невырожденный полупроводник с шириной запрещенной зоны в несколько десятков  $kT/q$  — кристалл, в котором средствами соответствующего легирования созданы условия «разряжения» ионизируемых центров по сравнению со всей совокупностью узлов решетки, то ширина обедненного слоя может быть существенной ( $L > a$ ). В этом случае складывается совершенно уникальное отношение вещей.

• Существенно то, что электропроводность легированного полупроводника, создаваемого на чистой (далее  $i$ -) основе (германий, кремний, алмаз и др.), собственная проводимость которой незначительна, носит искусственный характер. То есть, с фактором легирования привносится возможность моделирования типа электропроводности, ширины обедненного слоя, знака и плотности заряда подвижных носителей в «коконе». Реально, в кристалле «основы», моделируется специфическая структура («рабочее тело») с требуемыми характеристиками. Поэтому, носители заряда различают как основные (примесные), неосновные (генерируемые «основой» или инжекция), положительные и отрицательные.

### Максвелловская релаксация зарядов и эффект Ирли

«С ростом запирающего напряжения становится заметной уже неоднократно упоминавшаяся зависимость положения границ запирающего слоя от приложенного напряжения — явление, известное в теории транзистора под названием эффекта Ирли. В  $p$ - $n$  переходах оно не имеет большого значения, ...» [2, с. 58].

Если внутри изолированного блока электронной модели ( $n$ -тип), каким-либо образом изменить количество основных носителей заряда, то провоцируется локальное изменение концентрации «ткани» относительно равновесного значения ( $n_0$ ) и нарушение нейтральности. За время максвелловской релаксации ( $\tau_m$ ) [11] нейтральность будет восстановлена за счет подвижки (выравнивания) элементов «ткани» основных

носителей при сохранении концентраций  $n_0$ , но, как полагают, не из «глубоких слоев» [3], а за счет ширины ( $L > a$ ) обедненного слоя. Это и есть эффект Ирли.

Если нейтральность нарушается неосновными носителями (генерация основы, инжекция), то за время максвелловской релаксации ( $\tau_m$ ) неосновные будут (попарно) нейтрализованы основными (за счет ширины обедненного слоя). В идеализируемом случае отсутствия рекомбинации эти, разделяемые запрещенной зоной основы, пары неравновесных носителей будут выталкиваться (в поле градиента) на периферию уже в условиях нейтральности со скоростью, определяемой подвижностью.

• Во все эти процессы (известно) вмешиваются генерационно-рекомбинационные явления (закон действующих масс), что не меняет существа дела. «В обычных условиях контакта с окружающей средой атомарно-чистые поверхности не существуют, так как газы и другие примеси адсорбируются на ненасыщенных атомарных связях на поверхности» [15, с. 392], маскируя явление.

• В узком смысле, как досадная причина образования сквозных обратных связей [3], явление зависимости ширины обедненного ионного  $L$ -слоя ( $p$ - $n$  перехода) от приложенного напряжения (от количества неравновесных основных носителей, существующих при «почти  $n_0$  [2]» за счет ширины  $L > a$ ), называют в теории биполярных транзисторов «эффектом Ирли».

• Потенциальный барьер на границе кристалла запасаает энергию теплового фона — температуры окружающей Среды. Потенциальный барьер на границе невырожденного полупроводника чувствителен к эффекту Ирли.

Таков механизм зависимости ширины обедненного слоя от количества основных носителей в полупроводниковом блоке — так называемый эффект Ирли в широком смысле. При увеличении количества основных носителей ширина обедненного ионного слоя при постоянстве концентраций ( $n_0$ ) уменьшается, при уменьшении — увеличивается. Сам блок приобретает тот или иной знак и величину заряда. Каковы механизмы нарушения нейтральности?

### Механизм опосредованного управления инжекцией Медиатор (посредник)

«Это означает, что основные носители с концентрациями, почти не отличающимися от равновесных, по обе стороны от запирающего слоя будут либо проникать на некоторую глубину в запирающий слой, уменьшая его ширину, либо уходить из некоторого ранее нейтрального слоя, увеличивая ширину запирающего слоя» [2, с. 41].

На схеме рис. 1 изображен участок поверхности блока невырожденного полупроводника граничащей с вакуумом (или другой прозрачной для подвижных носителей средой). Предположим, что это электронная модель невырожденного полупроводника (n — тип). Приповерхностные электроны образуют «кокон». Обедненный ионный слой ( $L_n > a$ ) с потенциалом  $\Delta\phi$  занимает пространство по оси  $x$  от равновесной границы нейтральности ( $f_n$ ) до поверхности «0». Подвижные основные носители заряда обозначены серым цветом. Внутри блока, до условной границы нейтральности  $f_n$ , плотность их распределения («ткань»  $n_0$ ) постоянна. Внутри «кокона», часть которого располагается в пределах обедненного слоя  $L_n > a$ , плотность распределения тепловых носителей спадает экспоненциально (по закону Больцмана [2, с. 28]) от величины  $n_0$  на границе  $f_n$  (равновесная кривая «1») практически до нуля на границе  $f_p$  в вакууме (или другой прозрачной среде).

В нейтральном состоянии, на равновесной границе  $f_p$ , заряд «кокона» и «зеркальный» заряд обедненного ионного слоя взаимно компенсированы, тело нейтрально. Не получив дополнительно к фону энергию, необходимую для совершения «работы выхода» против индуцируемого заряда ионов, «кокон» (через границу инжекции  $i_n \equiv f_p$ ) не может покинуть практически ни один тепловой электрон. Подвижная граница инжекции  $i_n$  — это та же (предельная) граница  $f_p$ , но в неравновесном состоянии.

Вызываемое внешними факторами, например источником электронов  $e$  ( $U$ ) на рис. 1, изменение: 1) — количества (интеграл) «ткани» основных носителей в нейтральном объеме блока, в соответствии с эффектом Ирли инициирует 2) — из-

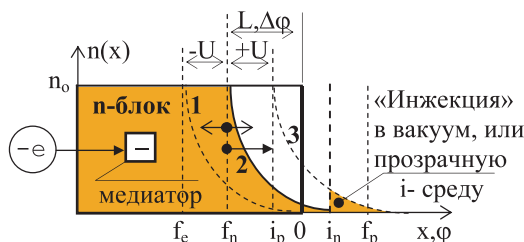


Рис. 1. Иллюстрация эффекта Ирли на границе кристалла с вакуумом или другой прозрачной средой. Заряд в вершине «кокона», пересекающий границу  $i_n$ , может быть объектом инжекции.

менение положения границы нейтральности ( $f_n$ ) от своего равновесного состояния и 3) — ширины обедненного слоя ( $L_n$ ). В результате происходит 4) — соответствующее изменение величины потенциального барьера  $\Delta\phi$  и именно в такой причинной связи. Как говорят, обедненный слой «дышит» [2]. Здесь можно обнаружить ряд существенных для уяснения функциональной структуры p-n-перехода обстоятельств.

- Контролируемое изменение положения границы нейтральности ( $f_n$ ), то есть управление шириной ( $L_n$ ) обедненного слоя и определяемой ими величиной потенциального барьера  $\Delta\phi$ , не прямо связано с действием внешнего фактора ( $U$ ). Существует опосредующее, интегрирующее звено из управляемого количества (при «постоянстве концентраций») подвижных основных носителей заряда («ткани») в нейтральном объеме блока (за счет функционально свободной ширины обедненного ионного слоя).

- В процессе управления «толщина» (амплитуда « $f_p - f_n$ » на рис. 1) «кокона», определяемая преимущественно температурой фона, остается в узком смысле постоянной. Другими словами, «При не слишком сильных электрических полях дрейфовая скорость намного меньше тепловой или, как говорят, температура носителей определяется температурой кристаллической решетки» [3, с. 36].

- Ток в любом сечении энергетической структуры кинетических носителей «кокона» (стоячей волны), очевидно, равен нулю, поскольку их восходящий поток в случае отсутствия потерь равен нисходящему [2, с. 40]. То есть энергетический «кокон» — структура нейтральная (закрывает эффект, который не является током при перемещении).

Очевидно, «ткань» кинетических носителей заряда в нейтральной части объема блока и подвижный «кокон» следует рассматривать как две функционально самостоятельные структуры. «Ткань» нейтральной части объема блока является посредником (медиатором) на границе нейтральности ( $f_n$ ) между внешними факторами ( $U$ ) и пространственным положением «кокона». Самодостаточный, константный «кокон» как бы привязан, «сидит» своим основанием на границе нейтральности ( $f_n$ ) и, не меняя амплитуды, движется вместе с ней. Изменяя количество основных носителей в нейтральной «ткани» (интегрирующее звено), можно опосредованно управлять, перемещая границу нейтральности ( $f_n$ ), пространственным положением «кокона» относительно границы инжекции  $i_n$ . То есть, можно изменять суммарный заряд части «энергетического пакета, кокона», перемещаемого через границу инжекции ( $i_n \equiv f_p$ ) в вакууме или другой, прозрачной для основных носителей среде.

При удалении основных носителей (медиатора) из «ткани» нейтральной части блока и соответствующем отрицательном смещении (сжатии) границы нейтральности ( $f_n$ ) весь «кокон» (кривая «2») может оказаться втянутым в тело — гиперполяризация. Тело приобретает заряд ионов — состояние экстракции. В случае увеличения количества медиатора, граница нейтральности будет вытеснять константный энергетический «кокон» (кривая 3) за пределы  $i_n$ , заряд тела приобретает знак основных носителей — состояние инжекции.

- Существенно то, что внешняя управляющая сила  $U$  (потенциал) и управляемая через интегрирующее звено медиатора величина потенциального барьера ( $\Delta\phi$ ,  $U_D$ ) (ширина  $L$ ) будут ортогонально (без обратного влияния) развязаны (не являются объектами сложения).

Итак, имея в виду закономерность существования «коккона» — энергоемкой стоячей волны с постоянной амплитудой или паттерна подвижных тепловых носителей заряда на срезе кристаллического тела с эффектом Ирли ( $L > a$ ), можно формально говорить о факторе инжекции подвижных носителей заряда в вакуум или другую прозрачную среду и механизме управления такой инжекцией на примере изолированного блока. Здесь выясняется ряд существенных, для понимания природы активности р-п-переходного слоя, моментов.

### Эффект инжекции

*«В классической электронной теории работа выхода истолковывается как работа, совершаемая электроном при его вылете из металла, во-первых, против сил притяжения со стороны положительных зарядов, индуцируемых электроном на поверхности металла, и, во-вторых, против сил электрического поля двойного электрического слоя. Этот слой возникает у поверхности металла благодаря тому, что в процессе теплового движения электроны проводимости могут пересекать поверхность металла, образуя около нее «электронное облако»... Такой двойной электрический слой подобен весьма тонкому заряженному конденсатору, одной из обкладок которого служит поверхность металла с находящимися на ней положительными ионами, а другой — «электронное облако». За пределами двойного слоя напряженность его электрического поля равно нулю» [8, с. 406].*

Реализуя (через интегрирование медиатора) процедуру положительного смещения границы нейтральности ( $f_n$ ), можно было бы начать перемещение «коккона» с постоянной амплитудой через границу инжекции  $i_n \equiv f_p$  и осуществить «слив» электронов (инжекцию подвижных носителей заряда) в вакуум или другую прозрачную среду. При этом процесс смещения границ развивается в двух направлениях. При вытеснении границы  $f_n$  в направлении поверхности, уменьшении ширины  $L_n$  и соответствующем уменьшении величины потенциального барьера ( $\Delta\phi$ ), граница инжекции от равновесной ( $f_p$ ) понижается во встречном направлении в позицию  $i_n$ , дополнительно открывая новые слои «коккона» в вакууме. Заряд носителей,

пересекающих равновесную границу инжекции  $i_n \equiv f_p$  экспоненциально связан с внешним напряжением (U). Но инжектируемые через границу  $i_n$  носители все еще остаются в поле действия индуцированного заряда ионного слоя барьерообразующей примеси в кристалле основы. Для преодоления этого барьера, источник внешней силы должен совершить работу выхода.

Необходимо прийти к пониманию того обстоятельства, что обсуждаемый здесь чувствительный к эффекту Ирли «потенциальный барьер на границе тела с вакуумом» и исключенный Шокли из анализа в виде граничных условий потенциальный барьер р-п-перехода есть единая, так или иначе проявляющая себя, сущность поверхностных (аномальных) состояний вещества. Равновесный, накапливающий энергию внешней Среды, автостабилизирующийся по температуре, чувствительный к эффекту Ирли поверхностный потенциальный барьер некоторых сред — структура самодостаточная и закономерная в природе, т. е. не требующая для своего существования дополнительных условий, как то твердотельный р-п-переход.

- В природе существуют готовые механизмы для стихийного возникновения таких вещей как управляемые извне, активные контакты — уникальный феномен поверхностных состояний вещества.

- Частный вывод (касательно парадигмы) состоит в том, что концептуально р-п-переход в принципе не верно представлять как единый (в опытах Хейнся-Шокли), пусть неоднородный монокристалл, в котором все процессы возникают как диффузионно-дрейфовое следствие металлургической нелинейности свойств на границе раздела «р» и «п» областей. В действительности, чтобы «понять физическую сущность явлений [13]», р-п-переход необходимо рассматривать как суперпозицию двух независимых объектов: — поляризующихся сред с «р» — свойствами и «п» — свойствами, т. е. антиподов электропроводности.

### Электронный и дырочный антиподы электропроводности

*«... максимальное значение суммы  $n^+p = n^+ n_p^2/n$ , равное  $2n_i$  при  $n = n_i$ , должно быть много меньше*

*$N_D$  и  $N_A$ ; в противном случае переход невозможен по определению» [14, с. 165].*

Полуметаллам и «металлам обедненные слои не свойственны» [14, с. 101]. Создаваемые искусственно, они обретают реальные очертания в примесных полупроводниках с концентрациями примесей между  $\sim 10^{18} \text{см}^{-3}$  для полуметаллов и  $\sim 10^{11} \text{см}^{-3}$  — собственных.

Искусство состоит в том, чтобы в чистом кристалле полупроводника (i-основе) с несущественной в рабочем диапазоне температур собственной проводимостью, «посадить» сравнительно небольшое (заданное) количество ионизируемых примесных атомов, которые становятся требуемым «рабочим телом». В некотором интервале концентраций примесей (полезных и вредных), полупроводники называют невырожденными, когда все еще сохраняются приемлемыми (функциональными) ширина запрещенной энергетической зоны основы и собственная проводимость, т. е. -  $L > a$ .

Главным достижением этого метода, решившим дальнейшую судьбу р-п-перехода и твердотельной электроники в целом, был доступ к созданию «рабочих тел» (блоков) с электрически зеркальными характеристиками. Были получены как рабочее тело с привычно металлическим, положительным ионом решетки кристалла и отрицательным зарядом проводимости (п-тип), и что существенно, так и его антипод — с отрицательным неподвижным ионом и положительным зарядом проводимости (р-тип).

На самом деле в дырочном полупроводнике (модели р-типа) дырки не имеют уровней, разрешенных в вакууме. Если, однако, представить, что граница легирования (барьерообразующей примеси) «0» делит блок основы (i-тип) на две части, то i-пространство основы для дырок модели р-типа и электронов модели п-типа будет представлять «космос вакуума» (рис. 1). То есть, в первом приближении р- и п-модели электропроводности внутри кристаллической основы равноценны, их чувствительные к эффекту Ирли ( $L > a$ ) потенциальные барьеры самодостаточны. Но как объекты зонной теории они имеют принципиально важное различие — это их комплементарность относительно энергетической щели основы.

Все это, в частности, означает, что суммарный ( $\pm$ ) биполярный «обедненный» слой р-п-перехода, как полагают, не пуст в равновесном состоянии. Здесь электронный и дырочный «коконы» не рекомбинируют, а стоят один в другом, разделяемые энергетической щелью основы. В идеализируемом случае, они могут взаимодействовать только через межзонную рекомбинацию, т. е. минимально (взаимодействуют опосредованно через «максвелловские» нарушительно-восстановительные процессы сохранения нейтральности). Следовательно, идеальный (без потерь на рекомбинацию) р-п-переход, прежде всего, представляет собой идеальный р-п-конденсатор. Для обратного смещения это просто очевидно. Прямое смещение — уникально, но существа дела не меняет.

### Симметричный электронно-дырочный переход

«Дырки, переходя в *n*-область, рекомбинируют с электронами, в результате чего концентрация электронов справа от границы уменьшается. Аналогично электроны из *n*-области (где их много) диффундируют в *p*-область (где их мало), ... вблизи границы раздела образуется ОПЗ (область пространственного заряда), в которой концентрация электронов и дырок понижена» [15]. «Область образовавшихся пространственных зарядов и есть область р-п перехода» [3, с. 87].

Такова «легенда». Для нас важно лишь то, что в р-п-переходе на границе раздела со стороны хотя бы одного из «антиподов» эффект Ирли предполагает существование функционально широкого ( $L > a$ ) пограничного обедненного ионного слоя (в «противном» случае р-п-переход не имеет физического смысла).

Предположим, имеется модель *n-i* диода. По природе, на границе антиподообразующей примеси внутри *i*-кристалла существует потенциальный барьер, который удерживает свой энергоемкий электронный «кокон» от «растекания» в *i*-область. При прямом смещении «кокон» будет продвигаться через границу  $i_n$ , инициируя условие инжекции неосновных носителей в *i*-область (кривая «3» на рис. 1). Тем не менее, чтобы «инжектируемые» носители «кокона» как неосновные могли перейти на

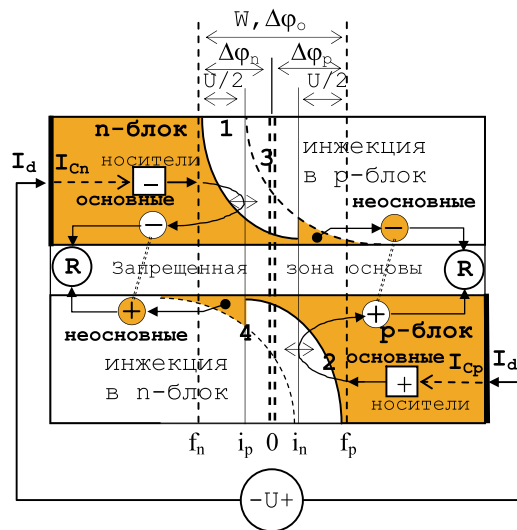


Рис.2. Схема, поясняющая элементы формирования, функциональной структуры и принципа действия симметричного («резкого») р-п-перехода.

уровни покоя и стать «диффузионным хвостом», они должны получить в пару неравновесные основные носители по другую сторону *i*-энергетической щели в качестве экрана. Не получив такой поддержки в *i*-области (здесь только незначительная собственная проводимость) инжекция насыщается. Суть в том, что не экранируемые основными, инжекционные неосновные носители «кокона» не могут преодолеть свой индуцированный потенциальный барьер на границе раздела сред (не могут покинуть свой паттерн).

• Другая ситуация складывается в контакте моделей «антиподов». При прямом смещении инжектируемые «хвосты» «коконов», которые по своей природе стремятся покинуть свой блок, взаимно проникают в нейтральные области с избыточным количеством экранирующих неравновесных основных носителей, без всякой реакции получают такую возможность. Их «уводят» (опекают, нейтрализуют, провожают) основные.

На рис. 2 изображена условная схема, поясняющая элементы формирования, функциональной структуры и принципа действия симметричного («резкого») р-п-перехода. Здесь совмещены две различные, выполненные на одной основе модели электропроводности. По горизонтали рисунок поделен двойной вертикальной пунктирной линией «0» на «р» и «n» области. Ординаты  $f_n$  и  $f_p$  обозначают положение границ нейтральности в блоках «антиподов» в равновесном состоянии. Ординаты  $i_p$

и  $i_n$  — те же границы, но в неравновесном состоянии при прямом смещении  $U$ .

По вертикали, относительно условного изображения энергетической щели основы в середине рисунка, сверху и снизу располагаются зоны проводимости *n*- и *p*-моделей. В равновесном состоянии разноименные, разделяемые запрещенной зоной «коконы» (кривые 1 и 2) территориально располагаются (стоят один в другом) в суммарном обедненном ионном слое ( $W = L_n + L_p$ ) между равновесными границами нейтральности  $f_n$  и  $f_p$ , не пересекая их, не инжектируя в соседние области.

• Закон сохранения для р-п-перехода, вероятно, состоялся бы в том, что система из двух контактирующих (взаимодействующих) нейтральных блоков «антиподов» будет нейтральной. Как следствие, наружные части их «коконов» будут размещаться в «чужих» обедненных слоях, не пересекая встречных ( $f_p$  и  $f_n$ ) границ нейтральности, не инжектируя, не нарушая, будучи нейтральными, нейтральности системы. Соответственно, в контакте блоков-антиподов границей инжекции ( $i_n$ ) для вершины *n*-кокона становится граница нейтральности *p*-блока ( $f_p \equiv i_n$ ) и, наоборот, для *p*-кокона граница нейтральности *n*-блока ( $f_n$ ) будет соответствовать границе инжекции ( $i_p \equiv f_n$ ).

• Здесь можно предположить, что переходной слой р-п-перехода по форме — суть продолжение «энергетической щели» кристалла основы с аналогичным поведением подвижных зарядов.

Нужно конечно понимать, что это только далекая от реальности и очень условная иллюстрация концепции существования естественной причины возникновения управляемых (активных [7]) контактов типа р-п-перехода, который, как говорят, «не может быть получен путем спайки или сварки соответствующих компонентов» [3].

### Р-Н-комплементарный механизм компенсации работы выхода

«При прямом смещении основные носители с концентрацией, практически равной равновесному значению, устремляются внутрь запирающего слоя, в то время как в запирающем состоянии они отсасываются из областей, прилегающих к границам запирающего слоя» [2, с. 59].

Итак, равновесный р-п-переход внешне представляет собой «пустой» конденсатор (двухполюсник). Теперь, в отличие от несколько абстрактного примера с изолированным блоком (рис. 1), в качестве внешнего управляющего (возмущающего, дестабилизирующего) фактора, вполне легально можно говорить о подключении биполярного источника (напряжения  $\pm U$ ) основных носителей заряда к нейтральным объемам «р» и «п» блоков. Не касаясь свойств электрических контактов полупроводникового материала с внешним источником напряжения ( $U$ ), отметим, что действие последнего в начальный момент сводится к перезаряду р-п-конденсатора (интегрированию медиатора) и выравниванию потенциалов при контактных областях блоков с потенциалом самого источника  $U$  (реактивные токи  $I_{Cn}$  и  $I_{Cp}$  на рис. 2). То есть, независимо от полярности внешнего источника смещения, первичным эффектом в контакте «антиподов» является управляемое положение (перемещение) энергетических «коконов» с постоянными амплитудами относительно границ инъекции ( $i_n$ ,  $i_p$ ).

• По сложившейся «легенде», действующее в р-п-переходе от внешнего источника  $U$  напряжение как бы складывается алгебраически с напряжением потенциального барьера  $U_D$ . «Приложенное извне напряжение суммируется с напряжением контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера

в этом случае изменится на величину, определяемую внешним напряжением» [16, с. 101].

Для количественной «легенды» годится, но принципиальное различие есть в том, что имеет место не прямое действие внешнего напряжения на суммарный потенциальный барьер  $\Delta\phi_0$  непосредственно, а реализуется опосредованное медиатором управление его величины по параметру ширины ( $W$ ) обедненного ионного слоя: — а) действует внешнее напряжение ( $U$ ), → б) — меняется количество (интеграл) носителей в нейтральном объеме, → в) — меняется ширина ( $L_n + L_p = W$ ) обедненного слоя, → г) и только тогда меняется величина потенциального барьера ( $\Delta\phi_0$ ).

Повторимся, существенно здесь то, что изменение напряжения потенциального барьера и действие внешней электрической силы как бы ортогонально разъединены (пространство → потенциал), без обратной реакции. То есть, новое положение границ нейтральности, через интегрирующее звено медиатора жестко связано только с величиной внешней электрической силы, не зависит от последующего фактора инъекции.

• «... в запирающем состоянии» основные носители (медиатор) «отсасываются из областей, прилегающих к границам запирающего слоя». Границы нейтральности отступают, обедненные ионные слои расширяются, потенциальные барьеры возрастают и становятся привлекательными для основных носителей извне (экстракция).

• «При прямом смещении основные носители с концентрацией, практически равной равновесному значению, устремляются внутрь запирающего слоя», реактивно заряжая р-п-конденсатор. Вытесняемые неравновесной частью своих медиаторов (белый квадрат на рис. 2), границы нейтральности  $f_p$  и  $f_n$  со своими «коконами» сдвигаются во встречном направлении. Занимая позиции  $i_p$  и  $i_n$ , эти границы «везжают» в пределы встречных нейтральных константных «коконов» (кривые 3 и 4), вершинные участки которых без всякой реакции, без затрат на работу выхода **экранируются** и оказываются **включенными** в нейтральные объемы антиподов.

Таким образом, «включение» (инъекция) неосновных носителей

в блок «антипода» протекает в р-п-переходе как естественный процесс нейтрализации дестабилизирующего действия источника  $U$ . Здесь следует обратить внимание на следующие события:

- За время  $\tau_m$  начинает происходить попарная нейтрализация (через энергетическую щель основы) неравновесных носителей-антиподов из инжектируемого «кокона» и неравновесной «ткани».

- Нейтрализующие основные неравновесные носители «ткани» перестают быть зарядом в обедненном слое (удаляются из переходного слоя, блокируя «силы притяжения и силы электрического поля»), смещают назад границу нейтральности (дуга перемещения заряда на рис. 2), сдерживая процесс внешней дестабилизации ( $U$ ).

- Нейтрализуемые инжектированные неосновные носители перестают быть зарядом (оказываются экранированными), теряют связь со своими «зеркальными» ионами и без затрат на работу выхода в процессе инъекции переходят на уровень покоя в блоке «антипода».

- В контакте «антиподов» акт инъекции, осуществляемый в обеспечение сохранности нарушаемой источником  $U$  нейтральности системы, происходит ненасильственно, естественно, нейтрально, без затрат активной мощности на работу выхода.

- Именно в случае биполярного р-п-перехода (контакта сред антиподов) механизмом инъекции реализуется параметрическая, р-п-комплементарная компенсация работы выхода подвижных носителей заряда из «кокона» (из своего блока).

- Суммарный заряд (интеграл) «кокона», перемещаемый через границу инъекции, экспоненциально связан с потенциалом, действующим в переходе от источника  $U$ .

- Инжектированные неравновесные неосновные носители, представляющие в р-п-переходе управляемую среду (рабочее тело), тем не менее, не могут перейти в ток внешней цепи, не став через механизмы рекомбинации током основных носителей (символ  $\otimes$  на рис. 2). То есть, без рекомбинации пар неравновесных зарядов, смещенный в прямом направлении р-п-переход остается идеальным конденсатором, реальный прямой ток не возникает.

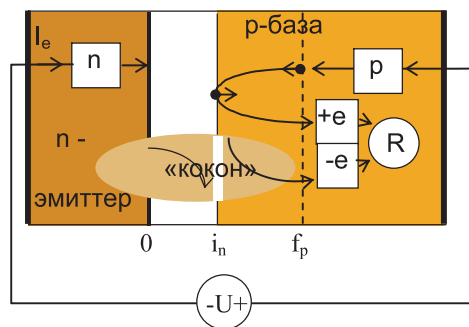
Перечисленные факторы составляют феномен, где контакт «антиподов», реализуя явление беззатратного управления пространственным положением «кокона» (эффект Ирли), осуществляет в р-п-переходном слое механизм **парадоксального** усиления слабого внешнего воздействия (приращение потенциала р-п-конденсатора,  $\Delta U$ ) на результат мощной «инъекции» неосновных (доступных теперь для других систем) носителей заряда.

•• Это усиление функционально тем больше, чем более мощная внешняя цепь потребления инжекционного тока складывается и, определяемое только физическими константами ( $q / k T$ ), не является свойством конструкции (структуры, контакта), его реализующим [6]. Об этом можно судить уже по тому, как р-п-переход (диод), в принципе, пропускает любой прямой ток цепи при незначительном приращении прямого «падения» напряжения ( $\Delta U$ ).

Очевидно, среди прочих, широко цитируемые здесь слова и понятия: «инжекция», «диффузионное напряжение», «падение напряжения в переходе» и др. — суть фигуранты все той же «легенды», но в силу необходимости отражающие новое качество. Не трудно представить, что в переходном слое происходит не «инжекция» (по смыслу слова впрыскивание), а эффективное перераспределение экранируемой на границе ( $i_n, i_p$ ) части энергии «коконов». То есть, процесс пересечения нейтральным «коконом» границы нейтральности не представляется «диффузионным током». Такой ток (экранированных неосновных носителей) возникнет за границей «инжекции» уже в условиях нейтральности в составе пар с неравновесными экранирующими основными носителями.

•• В р-п-переходе происходит не перенос, а перераспределение заряда.

Механизм переноса неосновных носителей через переход не является диффузионным, как бы не заблуждалась на этот счет формальная казуистика теории полупроводниковых приборов. Но, симметричный переход не эффективен, поскольку внешнее напряжение делится поровну между его относительно «маломощными» (высокоомными) обедненными слоями.



**Феномен инжекции — перераспределение энергии теплового фона**

Чтобы представить себе механизм «инжекции» носителей проводимости из энергетического «кокона» р-п-системы, удобнее всего проследить его только со стороны одного из «антиподов» и считать, что во втором значительно более низкоомном (с большей плотностью энергии в «коконе») ничего не меняется — почти так, как оно и происходит в несимметричном переходе на рис. 3.

• В качестве наглядного образа «кокон» условно можно представить в виде закрытого нейтрально самодостаточного объекта (эллиптическая фигура на рис. 3), энергия которого может быть перераспределена на контролируемой внешним потенциалом ( $U$ ) границе «инжекции»  $i_n$ .

При прямом смещении «падения» напряжения на низкоомном, сравнительно узком обедненном, предположим, п-слое будет относительно небольшим. В движение приходит практически только одна граница нейтральности высокоомного р-блока с существенной шириной обедненного слоя, называемого базой. Неравновесные дырки, при постоянстве концентраций поступающие от внешнего источника напряжения в нейтральный объем базы, пропорционально величине  $U$  «заряжают» р-п-конденсатор и без затрат активной мощности вытесняют (в собственной зоне проводимости) свою границу нейтральности в область расположения самодостаточной, мощной, нейтральной структуры «п-кокона» эмиттера, лежащей по другую сторону «энергетической щели». На неравновесной границе ( $i_n$ ) внутри нейтральных объемов блоков контактирования без затрат активной мощности появляется компенсирующий заряд неравновесных неосновных носите-

Рис.3. Несимметричный р-п-переход. Как нейтральный объект (стоячая волна), «кокон» представлен в виде эллиптической фигуры.

лей из энергетических «коконов» (и не суть важно, что в количественной теории этот факт можно интерпретировать как увеличение «границных концентраций»).

Мы не говорим, что через переход прошел ток (суммарный ток в «коконе» равен нулю), мы говорим, что часть кинетических носителей проводимости, отсекаемых экранирующей границей инжекции ( $i_n$ ), не вернулись на свой блок (или экранируемая часть волновых состояний «кокона» поглощается блоком антипода). Тем самым акцентируется внимание на том обстоятельстве, что механизм инжекции связан не с градиентной «диффузией» носителей заряда вследствие понижения «диффузионного запирающего потенциала  $U_D$ », а с перераспределением энергии двойного электрического слоя (запасаемой энергии «кокона»). На рис. 3 это обстоятельство условно проиллюстрировано стрелочками в виде разрывной функции на границе «инжекции» (перераспределение) потоков энергии в «коконе».

•• Потенциальный барьер здесь играет совершенно иную роль, чем ту, которую ему приписывают в р-п-переходе из «монокристаллической легенды». Он не сдерживает, как полагают, (запирает, уравнивает) диффузионный перепад концентраций разноименных носителей заряда на границе раздела перед инжекцией в кристалле, а сам представляет собой управляемый источник нейтральной инжекции в биполярной системе. Запирающим он является только по отношению своих собственных подвижных носителей заряда. Существенным фактором в процессе инжекции является не сама (текущая) величина потенциального барьера, что вторично, а контролируемое положение неравновесной границы нейтральности, так называемый эффект Ирли. «Инжекционный»

феномен (перераспределительный механизм) электронно-дырочной структуры связан не с «очевидным» фактом прямого действия внешней электрической силы на высоту потенциального барьера, для чего, если до конца следовать концепции «впрыскивания, диффузии», потребовались бы существенные энергетические затраты.

Итак, чтобы в обычных условиях, преодолев пограничный потенциальный барьер, вывести заряд за пределы тела и получить ток внешней цепи, ему требуется сообщить дополнительно к фону энергию, необходимую для совершения работы выхода, скажем, термоэлектронная эмиссия. В р-п-переходе этот эффект достигается в естественных условиях полученным доступом к беззатратному (активному) перераспределению энергии биполярного потенциального барьера в виде нейтральной «инъекции» мощного заряда неосновных носителей в нейтральный объем «антипода», где он становится доступным для взаимодействия с другими системами.

- В основе принципа действия р-п-образований лежит феномен беззатратного перераспределения (явление комплементарной компенсации работы выхода), накапливаемой в стоячей волне («кокона») приповерхностного биполярного потенциального барьера, энергии окружающей среды через механизм чувствительности ширины обедненных ионных слоев «антиподов» к изменению количества (интегралу) свободных носителей зарядов в нейтральном объеме от равновесной величины, т. н. эффект Ирли.

- Это уникальное свойство беззатратного перераспределения энергии фона в контакте кристаллообразных, антиподоподобных сред с управляемыми ионными слоями, в частности, не противоречит второму закону термодинамики, гласящему, что «Процесс, единственным результатом которого было бы изъятие энергии у окружающей его в работу, невозможен» [17].

- Задействованная в р-п-переходе энергия окружающего пространства не высвобождается для внешней работы, а перераспределяется по внутреннему контуру; не изменяя энтропии системы, делает ее АКТИВНОЙ.

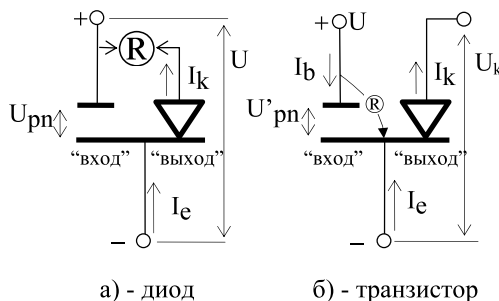


Рис. 4. Функциональная модель р-п-четырёхполюсника в диоде и биполярном транзисторе.

### Функциональная структура электронно-дырочного перехода — активный р-п-четырёхполюсник

Выходит то, что р-п-переход закономерно (стихийно) «возникает», по меньшей мере, при контакте электрически комплементарных сред, обладающих свойством поляризации приповерхностных подвижных и связанных носителей зарядов (тепловые электропотенциальные барьеры) с образованием чувствительных к эффекту Ирли обедненных слоев. При этом должно выполняться условие электрического сродства (прозрачности) веществ-антиподов с подвижными носителями зарядов-антиподов.

Фактически р-п-переход работает примерно следующим образом — внешнее напряжение начинает заряжать р-п-конденсатор. По мере накопления в обедненном р-слое заряда (+) неравновесных основных носителей (р-медиатора, см. рис. 3), происходит пространственное смещение (стрелка к центру) неравновесной границы нейтральности ( $i_n$ ) от равновесного положения ( $f_p$ ). Как только граница  $i_n$  «въезжает» в расположение вершинной части «п-кокона», происходит экранирование соответствующей части неосновных носителей. Разделяемые энергетической щелью основы, неравновесные экранируемые неосновные и основные носители заряда нейтрализуются, но не за счет «глубоких слоев» [3, с. 76], а за счет ширины обедненного пространства (стрелка от центра). Образно говоря, под действием внешней дестабилизирующей электрической силы нейтральный объем расширяется и поглощает часть «п-кокона». Кинетические (ставшие неосновными) носители «п-кокона», оказываясь в тени «ткани», экранируются основными, теряют контроль со стороны собственных ионов и без затрат на работу выхода «переходят» на уровни «покою» в нейтральном объеме р-антипода. Тем самым, в контакте р-п-анти-

подов осуществляется процесс, направленный на нейтрализацию действия внешней возмущающей электрической силы, на восстановление (квази) равновесной ширины W.

- По природе кинетические носители стремятся покинуть свой «блок». Попадая в прозрачную экранирующую среду, они без реакции отрываются от своих ионов вместе со своим импульсом. И, предположим, разноименные, разделяемые «энергетической щелью» основы пары носителей заряда пока что не рекомбинируют и пока что никуда не долетели.

Тогда становится очевидной четырёхполюсная структура р-п-перехода, т. е. полная независимость механизмов зарядового управления потенциальным барьером и потребления «инжекционного» тока — в полном смысле существование независимых каналов «входа» и «выхода».

При прямом смещении в отсутствии рекомбинации, нейтрализующий внешнюю силу (U) процесс удовлетворялся бы только тем, что инжектируемые неосновные носители отвлекали бы от потенциального барьера на себя неравновесную часть основных (входных от батарейки) носителей, сдерживая процесс управляемой дестабилизации. Поскольку внешний источник тока стремится зарядить р-п-конденсатор основными носителями, а ответная «инъекция» неосновных носителей с экспоненциальным запасом способна компенсировать входной управляющий заряд, то их пары, в отсутствие рекомбинации не способные замкнуть внешнюю цепь, накапливались бы бесконечно, создавая парадоксальную ситуацию. С одной стороны, р-п-конденсатор оказался бы «черной дырой», куда непрерывно продолжал бы стекать внешний зарядный ток, создавая иллюзию замкнутой цепи, а с другой, в том же объеме, шло бы параллельное, как говорят, «в условиях нейтральности», неограниченное накопление заряда «экранируемых» неосновных носителей.



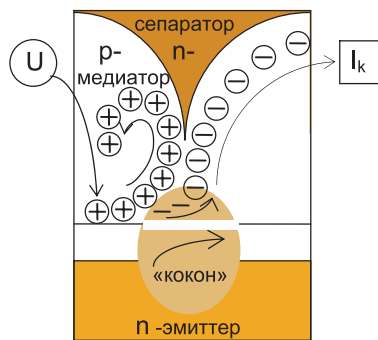
•• На этом этапе, основные и неосновные носители, **разделяемые запрещенной зоной основы**, сосуществуют нейтральными парами. Основные носители представляют субстрат **входного** канала, а неосновные — продукт **выходного** канала, которые явно разделены «черным ящиком» р-п-перехода.

Если теперь представить, что на пути пар разноименных носителей зарядов стоит «мембрана» (сепаратор, коллектор), пропускающая только неосновные носители (Максвелл предпочитал «демона»), то ситуация обретает реальные черты. «Мембрана» такая, что сепарирует, канализирует и преобразует «инжектируемые» неосновные носители в основные, которые, оказываясь, теперь можно использовать по усмотрению. Разделя неравновесные заряды, такая мембрана **физически разъединяет «вход» и «выход»** внутреннего, активного четырехполюсника р-п-системы.

•• В диоде такой «сепаратор» отсутствует, и «выходной» «инжекционный» ток через рекомбинацию (символ ®) «подключается» к тем же контактам, что и цепь управления «входного» р-п-конденсатора, образуя известную по «легенде» **двуполосную** конструкцию (рис. 4, а). Цепь р-п-конденсатора (**ВХОД** основных носителей р-п-четырёхполюсника) соединена параллельно с цепью мощного управляемого «инжектора» неосновных носителей (**ВЫХОД** р-п-четырёхполюсника). Другими словами, в диоде его внутренний р-п-четырёхполюсник с феноменальным усилением охвачен жесткой ООС.

• Именно здесь лежит причина того, что напряжение на переходе (р-п-конденсаторе) повторяет («отслеживает») **больцмановскую функцию** экспоненциальной зависимости величины «инжекционного» тока от высоты потенциального барьера (что называется, ВАХ диода).

•• В биполярном транзисторе, разделяемые «мембраной-коллектором», неосновные носители «покидают» свою пару и канализируются в организованную для них специальную электрическую (коллекторную) цепь ( $I_k$  — рис. 5). Однако, «покинутые» основные носители, как иногда говорят, не «уходят обратно на электрод базы», а обретают возможность **накапливаться** в области пространственно-заряда и начинают оказывать влияние на «парадоксальную» ситуацию.



**Рис. 5. Разделя неравновесные заряды, р-п-«сепаратор» коллектора физически разъединяет «вход» и «выход» р-п-четырёхполюсника эмиттера.**

Суть в том, что ненасыщаемый в отсутствие рекомбинации режим «черной дыры» р-п-конденсатора связан с удалением на бесконечную нейтрализацию неравновесного ионного слоя, потенциал которого не в состоянии сравниться с напряжением внешнего источника  $U$ . Как только режим опеки неосновных носителей посредством коллектора блокируется, потерявшие «физическую» работу основные носители приступают к заряду входного р-п-конденсатора. Потенциал внутри перехода и ожидаемое напряжение на внешних контактах выравниваются, ток во входной цепи (конденсаторе) р-п-четырёхполюсника прекращается. При этом, «инжекционный» выходной ток в канале «коллектора» продолжается, а величина его в реальном переходе экспоненциально связана с величиной внешнего напряжения во входном канале —  $I_e \approx I_k = I_s (\exp^{U/U_1} - 1)$ .

Поскольку теперь цепи «входа» и «выхода» эмиттерного р-п-перехода разделены, а через входной р-п-конденсатор (базовый электрод) в установившемся режиме ток, в принципе, не протекает (для статики в том нет функциональной и физической необходимости), то выходной ток в идеализируемом случае определяется входным потенциалом [5]. Следовательно, из всего теоретического набора количественно равноценных систем параметров, физической характеристикой усилительных свойств биполярного транзистора является крутизна прямого преобразования тока коллектора с точностью до рекомбинационных потерь неосновных носителей в пролетном пространстве базы, равная крутизне

эмиттерного р-п-четырёхполюсника —  $S_e \approx S_k = I_k/U$ . Что же касается понятия «падение напряжения» на диоде, по сложившейся легенде как падение напряжения на нелинейности с вольтамперной характеристикой р-п-перехода от протекающего по цепи тока, то можно прийти к пониманию, что в реальности не существует ни того, ни другого. В р-п-переходе все происходит гораздо замечательнее.

### Диффузионный ток проводимости?

Как бы еще раз парадоксально это ни звучало, но **внешней** силовой ток цепи диода не протекает через переход, т. е. в широком смысле не является «неравновесным» диффузионным током проводимости через запирающий слой и в силу этого не может быть причиной падения напряжения  $U_{pn}$  в омическом смысле. Концептуальное отличие состоит в том, что обычно под «инжекцией» в «легенде» подразумевается режим диффузионного преодоления принудительно понижаемого «запирающего» потенциального барьера (т. н. нарушения баланса) р-п-перехода сквозным прямым током, который начинается и заканчивается на клеммах внешнего источника напряжения.

Излагаемая концепция приводит к пониманию того, что перераспределительный механизм переноса «инжекционного» тока из энергетической структуры «кокона» в своей основе не связан с преодолением сопротивления среды р-п-переходного слоя.

• Вероятно, на границе нейтральности («инжекции»)  $i_n$  происходит как бы прерывание волновой структуры кинетических основных носителей «кокона», чтобы по другую сторону, в условиях нейтральности, возникнуть в виде энергетического пакета диффузионного тока неосновных носителей. В «коне» как бы имитируется бесконечное переходное сопротивление, разрыв, неопределенность — может быть нечто подобное описываемому случаю восходящего торможения возбужденного электрона в энергетической щели, где в момент равенства длины волны ( $\lambda$ ) электрона шагу кристаллической решетки ( $a$ ), по определению [3, с. 14] « $\lambda = a$  имеет место своеобраз-

ный резонанс, когда внешнее поле «не действует» на электрон, т. е.  $m' = \infty$ ,  $m'$ -эквивалентная масса электрона.

Реально, прямое дифференциальное сопротивление пропорционально обратной величине прямого тока цепи, но и это не тот ток, который может образовывать в переходе падение напряжения в омическом смысле. Напряжение и ток в выражении  $I = I_s (\exp^{U/U_t} - 1)$  относятся к принципиально разным цепям «черного ящика» — активному р-п-четырёхполюсника.

• Повторяясь, о токе неосновных носителей в р-п-переходе лучше сказать, что он не протекает, а перераспределяется из «кокона», не оставляя следов в виде падения напряжения. То есть, нейтральный «кокон» не является током при пересечении границы нейтральности блока «антипода». В этом, собственно, и заключена сущность прямого, принимающего чрезвычайно малые значения, дифференциального сопротивления р-п-перехода  $r_e = 1/S_e$ , где  $S_e = I_e q/kT$  — крутизна прямого преобразования р-п-четырёхполюсника как инжектора. То есть, по сути, энергетическая структура «кокона» может обеспечить любой ток (мощность) внешней цепи при незначительном приращении управляющего (прямого) напряжения на входе р-п-четырёхполюсника ( $\Delta U_{pn}$ ).

То, что называют падением напряжения  $U_{pn}$ , связано с входной цепью внутреннего р-п-четырёхполюсника. В идеализируемом случае это напряжение входного р-п-конденсатора, «зарегулированного» выходной цепью р-п-инжектора, в реальном — напряжение «входного диода» (шунтируемого выходной цепью р-п-инжектора).

### «Входной диод» биполярного транзистора

Итак, при прямом включении диода, источник  $U$  (внешняя цепь) выполняет двойную функцию: — реактивное, беззатратное (опосредованное) управление «инжектором» по «входному» каналу и поддержка мощного инжекционного тока — по «выходному».

Вполне очевидно, что обе функции, возбуждение и отбор «инжекционного» тока, производимые внешней (в широком смысле, дестабилизирующей) электрической

силой, осуществляются двумя связанными механизмами р-п-системы. Возбуждение возникает в результате релаксационного изменения ширины обедненного слоя при интегрировании неравновесного заряда основных носителей от внешнего источника ( $U$ ). Экстракция неравновесных неосновных носителей осуществляется в ту же цепь, но через механизм рекомбинации уже в условиях нейтральности. Условно эти функции могут быть представлены двумя параллельными каналами ( $U_{pn}$  и  $I_k$ ) на эквивалентной схеме (рис. 4, а), а структура р-п-перехода определена, как запараллеленный четырехполюсник с коэффициентом прямого преобразования напряжение-ток и усилением, по мощности существенно превышающим единицу.

Здесь самое время снять все связанные с предполагаемой идеализацией ограничения на время жизни неосновных носителей заряда («рабочего тела») в р-п-системе. Вход и выход активного ( $S_e = I_e q/kT$ ) р-п-четырёхполюсника разомкнут до тех пор, пока не началась токообразующая рекомбинация неравновесных пар основных-неосновных носителей в нейтральном объеме (реально она начинается уже в обедненном слое). Все, что в активной в р-п-системе эмиттера происходит до рекомбинации, может работать на транзистор (на усиление мощности сигнала), после рекомбинации — только на **ВХОДНОЙ ДИОД**, рис. 4, б. Входной диод (база-эмиттер в транзисторе) в своей миссии повторяет все свойства запараллеленного р-п-четырёхполюсника. Здесь выход инжектора делится на два канала, один из которых питает цепь коллектора ( $I_k$ ), второй ( $I_b$ ) — шунтирует входной р-п-конденсатор в «просто» входном диоде. Таким образом, усиление биполярного транзистора обуславливает не «transfer» коллектор [16], а «active» р-п-эмиттер.

• В реальности, существование «входного диода» есть следствие «закона действующих масс» (генерационно-рекомбинационного равновесия в запрещенной зоне кристалла основы). Именно по этой причине входной ток (базы) как пропорциональная доля инжекционного тока (коллектора) неизбежен, что и фиксирует количественная теория.

### Заключение

*«В историческом плане еще не было случая, когда совсем молодая, развивающаяся невиданно быстрыми темпами и весьма сложная в техническом отношении отрасль промышленности получила бы столь широкое распространение за короткий срок, не оставив без своего воздействия практически ни одной стороны жизни людей. ... Человеческое общество и электроника переплетаются между собой все теснее и теснее. Как и почему произошел этот сдвиг? К чему он приведет? Какие новые отрасли электроники займут господствующее положение?» [18]*

Едва ли в настоящее время существует ясное представление о глубинном смысле набирающей силу системы знания, ассоциируемой с широко употребляемым теперь понятием «электроника». Как бы ни называть эту синтетическую науку — ее движущая сила, очевидно, находится в согласии с «идеями» Вселенского сценария по воплощению воспроизводимого материального носителя деятельности интеллекта в Природе.

Эффект Электроники как инструмента поддержки потоков информации состоит в том, что по своей сути и в отличие от других естественных наук, она является отображением одной из форм движения материи. Тот же процесс физического воплощения интеллектуальной сущности Мироздания в белковой форме прокладывает свой путь к более мощной (?) электронной (кибер) форме. То есть, доступный Природе протоплазменный интеллект строит (по Аристотелю) «вместилище» электронного интеллекта. Но, вероятнее всего, Электроника — это только начальная стадия последующих этапов, которые будут называть, скажем, Позитроникой или Нейтриникой? Но будет ли это все еще человеческая речь? Трудно гадать, как в таком случае «поступит» Эволюция, если уже теперь не слишком фантазийно выглядит электроника на молекулярном и атомарном уровнях, на белковой основе. Ее продолжение в сращивании с живой материей не кажется невозможным. «Человек познающий» не ведает, что творит, если волен. Сейчас можно лишь утверждать, что под эту идею «ложатся» все объединяемые под «крышей» Электроники науки Реальности, весь

накопленный человечеством опыт. И можно сказать больше: «идея» живой материи и «идея» Электроники есть звенья одной цепи.

В этой цепи открытие тайны «черного ящика» р-п-переходного слоя поднимает «тривиальный» полупроводниковый диод в ряд основополагающих природных явлений на стыке физики, биологии, эволюционной химии, религии и не только. На примере электронно-дырочного перехода как частного случая взаимодействия определенным образом организованных электропроводных сред привлекает внимание сущность явления параметрической компенсации «работы выхода», в широком смысле как фактор контроля энергии теплового фона.

Формально тема твердотельного р-п-перехода проходит в экспериментально-теоретической среде ФТТ как рядовой и объективно полностью исчерпанный эпизод. Предлагаемое здесь на основании полученного таким образом описания не определяемое в парадигме ФТТ объяснение явления р-п-переходного слоя показывает область ее дальнейшего развития на качественно новом уровне как аспекта, очевидно, более широкого класса взаимодействий кристаллообразных антиподоподобных поляризующихся электропроводных сред в природе.

Можно признать, что как твердотельный аналог, р-п-переход есть не просто некоторым способом легированный полупроводниковый кристалл с нелинейными электрическими (вентильными) свойствами — двухполосник, как его интерпретирует «Физика твердого тела». Это активная структура, функционально эквивалентная замкнутому с «выхода» на «вход» активному электрическому (р-п) четырехполоснику с феноменальной кругизной прямой передачи, величина которой  $S_e = I_e q / kT$  определяется только мощностью внешней цепи (поток  $I_e$ ) и известными физическими константами  $T$ ,  $k$ ,  $q$ . Очевидно, свойство усиления «внутреннего» р-п четырехполосника не является признаком конструкции и относится к случаю закономерных природных явлений и, следовательно, в том или ином виде может проявляться в других, подобных электронно-дырочному переходу структурах и взаимодействиях. При определен-

ном стечении обстоятельств такой внутренний активный «четыре-полосник» на грани раздела некоторых электропроводных сред может быть разомкнутым и функционировать как эффективный усилитель (преобразователь) электрических величин (усилитель мощности) — как-то, известный биполярный транзистор или, можно утверждать, живые (клеточные) мембраны. В этих примерах весьма несхожими средствами реализовано глобальное явление активности (контроль энергии фона) на границе разделения определенным образом организованных электропроводных сред. Обнаруживающий себя в таком виде эффект активности энергии фона в р-п-переходе на макроуровне, на микроуровне, как явление параметрической компенсации работы выхода, по сути, вероятно проявляется в механизмах катализа и др.

Именно электронно-дырочный прообраз явления естественной мембранной активности на границе раздела некоторых капельно-пленочных сред [19] на уровне «неживой» природы в «доактуалистический» период бытия Земли, вероятно, может рассматриваться как закономерная причина, необходимое условие существования естественных механизмов и основы процессов клеточного строительства, формирующая тем самым стабильные эволюционные состояния стихийного зарождения (проб и ошибок) пробионтов любого толка [20], а в качестве основы принципа каталитических реакций — как достаточное условие закономерности и неизбежности этапов эволюционно-химических процессов воспроизводства жизни в благоприятных условиях [21].

Новые представления, в частности, вносят определенность в далеко затянувшиеся научные споры вокруг якобы исчезающе малой математической вероятности [20], вплоть до отрицания всякой материалистической возможности [22] не соиздающего начала жизни на Земле. В природе существуют готовые механизмы для СТИХИЙНОГО возникновения таких вещей, как управляемые, чувствительные к внешним факторам функционально активные контакты — как инструмент эволюции на грани раздела минеральной среды и протоплазмы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пайтген Х. — О, Рихтер П. Х. Красота Фракталов. М.: Мир, 1993.
2. Пауль Р. ТРАНЗИСТОРЫ. М.: Советское радио, 1973.
3. Степаенко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1973.
4. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых устройствах. М.: Атомиздат, 1969.
5. Поляков В. А. К вопросу идеологии биполярного транзистора (радиационный ресурс)// Радиопромышленность, 2000. Вып. 2. С. 61-76.
6. Поляков В. А. К вопросу идеологии электронно-дырочного перехода (о принципе действия биполярного транзистора)// Радиопромышленность, 2000, Вып. 2. С. 77-97.
7. Поляков В. А. К вопросу идеологии поверхностных состояний вещества (электронно-дырочный переход, живые мембраны)// Радиопромышленность, 2000, Вып. 4. С. 31-75.
8. Горбачев В. В., Спицына Л. Г. Физика полупроводников и металлов. М.: Металлургия, 1982.
9. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1974.
10. Фистуль В. И. Введение в физику полупроводников. М.: Высшая школа, 1975.
11. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.
12. Матосов М. В. Физика работы выхода электрона. М.: Издательство МАИ, 1989.
13. Спиридонов Н. С. Основы теории транзисторов. Киев: Техника, 1975.
14. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: МИР, 1977.
15. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
16. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1970.
17. Под редакцией Кривицкого Б. Х., Дулина В. Н. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Т. 1. М.: Энергия, 1977.
18. Прошлое, настоящее будущее// Электроника, М.: МИР, 1980.
19. Меклер Л. Б. О происхождении живых клеток: эволюция биологически значимых молекул — переход химической эволюции в биологическую. Новый подход к проблеме// ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1980. Т. XXV. № 4. С. 460.
20. Подборка статей о происхождении и эволюции жизни// ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1980. Т. XXV. № 3, 4.
21. Руденко А. П. Эволюционная химия и естественноисторический подход к проблеме происхождения жизни// ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1980. Т. XXV. № 4. С. 390.
22. Бен Хобринк ЭВОЛЮЦИЯ. М.: Мартис, 1993.