

К ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ p-n-ПЕРЕХОДА

Поляков В. А.

Научно-исследовательский
институт
радиоприборостроения,
г. Москва

(Окончание.

Начало в №4(34) 2004)

"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" [5, с. 59].

Итак, равновесный p-n-переход внешне представляет собой "пустой" конденсатор (двухполюсник с "утечками"). 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 p- и n-блоков. Не касаясь свойств электрических контактов полупроводникового материала с внешним источником напряжения (U), отметим, что действие последнего в начальный момент сводится к перезаряду p-n-конденсатора (**интегрированию** медиатора) и выравниванию потенциалов приконтактных областей 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 инжекции (i_n, i_p).

● По сложившейся "легенде", действующее в p-n-переходе от внешнего источника напряжение U как бы складывается алгебраически с напряжением потенциального барьера. **Я. А. Федотов:** "Приложенное извне напряжение суммируется с напряжением контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера в этом случае изменится на величину, определяемую внешним напряжением" [9, с. 101].

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

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

● "... 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

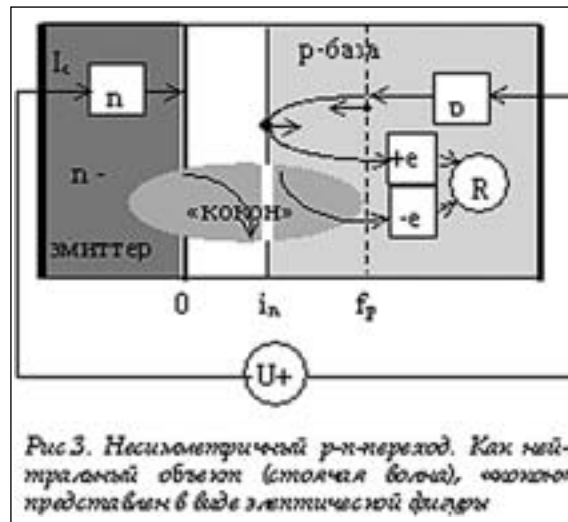


Рис. 3. Несимметричный p-n-переход. Как нейтральный объект (столбчатый волон), коконом представим в виде эллиптической фидеры

значению, устремляются внутрь запирающего слоя", реактивно заряжая p-n-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 "въезжают" в пределы встречных нейтральных константных "коконов" (кривые 3 и 4), вершинные участки которых без всякой реакции **экранируются** и оказываются **включенными** в нейтральные объемы антиподов.

"Включение" (инжекция) неосновных носителей в блок "антипода" протекает как **естественный процесс нейтрализации** дестабилизирующего действия источника U . Здесь следует обратить внимание на следующие события.

● За время τ_n начинает осуществляться попарная нейтрализация



(разделяемых энергетической щелью основы) неравновесных носителей-антиподов из инжектируемого "кокона" и неравновесной "ткани".

● Нейтрализованные основные неравновесные носители "ткани" перестают быть зарядом в обедненном слое (удаляются из переходного слоя), смещают назад границу нейтральности (дуга перемещения заряда на рис. 2), сдерживая процесс внешней дестабилизации (U).

● Нейтрализуемые инжектируемые неосновные носители перестают быть зарядом (оказываются **экранированными**), теряют связь со своими "зеркальными" ионами и без затрат на работу выхода в процессе инжекции переходят на уровень покоя в блоке "антипода".

● В контакте "антиподов" акт инжекции, осуществляемый в обеспечение сохранности нарушаемой источником U нейтральности системы, происходит ненасильственно, естественно, нейтрально, без затрат активной мощности.

● Именно в случае биполярного р-п-перехода (контакта сред антиподов) механизм инжекции реализуется параметрическая, комплексная компенсация **работы выхода** подвижных носителей заряда из "кокона" (из своего блока).

● Суммарный заряд (интеграл) "кокона", перемещаемый через границу инжекции, экспоненциально связан с потенциалом, действующим в переходе от источника U.

● Инжектируемые 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, **прямой ток не возникает**.

● При контакте "антиподов" явление беззатратного управления пространственным положением "кокона" (эффект Ирли) реализует в переходном слое механизм **парадоксального** усиления слабого внеш-

него воздействия (приращение потенциала р-п-конденсатора) на результат мощной "инъекции" заряда уже в условиях нейтральности.

● **Это усиление функционально тем больше, чем более мощная внешняя цепь потребления инжекционного тока складывается и, определяемое только физическими константами (q/kT), не является свойством конструкции (структуры, контакта), его реализующим [4].** 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 (ΔU).

Очевидно, что широко цитируемые здесь слова и понятия: "инжекция", "диффузионное напряжение", "падение напряжения в переходе" и др. - суть фигуранты все той же "легенды", но достаточно понимать, что происходит в действительности. Нетрудно представить, что в переходном слое происходит не "инжекция" (по смыслу слова - впрыскивание), а пассивное перераспределение экранируемой на границе (i_n, i_p) части энергии "кокона". То есть процесс пересечения **нейтральным** "коконом" границы нейтральности не представляется "диффузионным током". Такой ток возникнет от границы "инъекции" уже в условиях нейтральности, в составе пар с неравновесными экранирующими основными носителями.

● **В р-п-переходе происходит перенос, а перераспределение заряда (энергии).** Образно говоря, нейтральное "тело кокона" "протыкает" границу нейтрального объема "антипода" и только в результате экранирования основными расссывается в виде диффузии.

Механизм переноса неосновных носителей через переход не является **диффузионным**, как бы ни 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 фона

Чтобы представить себе механизм "инъекции" 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 (рис. 3).

● В качестве наглядного образа энергетический "кокон" условно можно представить в виде закрытого нейтрального самодостаточного энергетического объекта (эллиптическая фигура на рис. 3), который может быть перераспределен на контролируемой внешним потенциалом (U) границе "инъекции" i_n .

При прямом смещении "падение" напряжения на низкоомном, сравнительно узком обедненном, предположим, п-слое будет относительно небольшим. В движении 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". Поступающие в нарушение нейтральности от источника U **неравновесные** дырки, смещая границу "экранирования" i_n , интегрируют пространство неподвижного электронного "кокона". Пары неравновесных, **разделяемых энергетической щелью** "основы" носителей образуют нейтральный "раствор". То есть из **нейтрального**

"коконе", где компенсированы восходящий и нисходящий потоки зарядов и суммарный ток равен нулю, в "условиях нейтральности" на границе i_n перераспределяется **нейтрализующий** заряд в блок "антипода", где компенсированы неравновесные пары основных и "экранируемых" неосновных носителей.

Другими словами, процесс инжекции носителей заряда через границу нейтральности, как эффект нейтрализующий, не является током в прямом смысле. То, что в конечном итоге называют током внешней цепи, возникнет только, если неравновесные, нейтральные пары зарядов **рекомбинируют** (символ \otimes на рис. 3). В противоположном случае, как говорят в *условиях нейтральности*, неравновесные пары носителей накапливались бы бесконечно.

Итак, на неравновесной границе (i_n) **внутри** нейтрального объема блока контактирования появляется компенсирующий заряд неосновных носителей из энергетического "коконе" (и не суть важно, что в количественной теории этот факт можно интерпретировать, как увеличение "граничных 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, не вернулись на свой блок (или экранируемая часть волновых состояний "коконе" 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_b ", а с **перераспределением энергии двойного электрического слоя** (энергии "коконе"). На рис. 3 это обстоятельство условно проиллюстрировано стрелочками в виде разрывной функции на границе "инъекции" 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 (*запирает, уравнивает*), как полагают, 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 к **своим** собственным подвижным носителям 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.

● Медиатор может быть вброшенным непосредственно в переходной слой извне ("горсть" неосновных носителей), как, например, эффект деполяризации в живых клеточных мембранах (возбуждение потенциала действия) при раскрытии синаптических пузырьков с веществом медиатора. Результат смещения границы i_n в р-п-переходе будет тот же, что и при действии источника U . "Кокон" отдаст часть своей энергии, и во внешней цепи "диода" возникнет "даровой" ток. В действительности такую "горсть" можно получить только путем генерации основных носителей заряда через энергетическую щель кристалла основы (через нарушение генерационно-рекомбинационного равновесия), затратив энергию при тепловом или квантовом возбуждении (например, фо-

тоэффект). Поэтому возможно, учитывая КПД, только преобразование видов энергии.

Чтобы в обычных условиях, преодолев пограничный потенциальный барьер, вывести заряд за пределы тела и получить ток внешней цепи, ему необходимо сообщить дополнительно к фону энергию, достаточную для совершения работы выхода (скажем, термоэмиссия). В р-п-переходе этот эффект достигается в естественных условиях по-

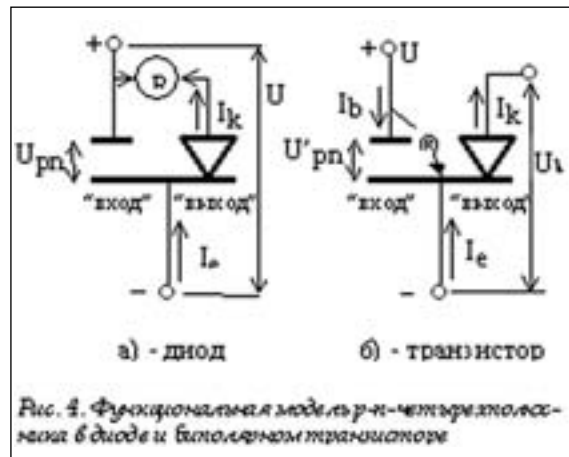


Рис. 4. Функциональная модель р-п-четырехконтактной структуры в диоде и биполярном транзисторе

лученным 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 ("коконе") 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, так называемый 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, который гласит, что *"процесс, единственным результатом которого было бы изъятие энергии у окружающего пространства и превращение его в работу, невозможен"* [14].

● ● 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.

Функциональная структура электронно-дырочного перехода – активный р-п-четырёхполюсник

Выходит, что р-п-переход **закономерно** (стихийно) "возникает" при контакте веществ-антиподов электропроводности (комплементарных сред), для которых свойственны расслоения (поляризация) приповерхностных (приконтактных) 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** (освобождение) соответствующей части неосновных носителей. Разделяемые энергетической щелью основы, неравновесные экранируемые неосновные и основные носители заряда нейтрализуются, но не за

счет "глубоких слоев" [7, с. 76], а от границ 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 "покоя" в нейтральном объеме р-антипода. Таким образом, в контакте р-п-антиподов 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 экранирующую среду, они без реакции отрываются вместе со своим импульсом).

Получается так: иницируя встречную инжекцию, внешняя управляющая электрическая сила при постоянстве концентраций послойно интегрирует (сдвигает) через весь объем ткань основных носителей к границе ионного слоя. Частично уже по дороге основные носители вымываются встречным диффузионным потоком экранируемых неосновных носителей, накапливаются нейтральными парами в нейтральном объеме теперь уже неравновесном объеме (рис. 3). **И, предположим, разноименные, разделяемые "энергетической щелью" основы пары носителей заряда пока что не рекомбинируют и пока что куда не долетели.**

Тогда становится очевидной **четырёхполюсная структура р-п-перехода**, то есть полная независимость механизмов зарядового управления потенциальным барьером и потребления инжекционного - в полном смысле существование **независимых каналов "входа" и "выхода"**.

При прямом смещении и 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 "инжекция" неосновных носителей с **экспоненциальным** запасом способна компенсировать входной управляющий заряд, то их пары, при отсутствии 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, существуют 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, диффундирующих в сторону уменьшения градиента концентраций или просто накапливающихся в одном объеме, стоит "мембрана" (сепаратор, коллектор), пропускающая только неосновные носители (Максвелл предпочитал "демона"), то ситуация обретает реальные черты.

"Мембрана" сепарирует, канализирует и преобразует "инжектируемые" неосновные носители в основные, которые, оказывается, теперь можно использовать по усмотрению. Разделяя неравновесные заряды, такая мембрана **ФИЗИЧЕСКИ разъединяет "вход" и "выход"** активного внутреннего **четырёхполюсника** р-п-системы.

● ● В диоде такой "сепаратор" отсутствует, и "выходной инжекционный" ток через **рекомбинацию** "подключается" к тем же контактам, что и цепь управления "входного" р-п-конденсатора, образуя известную по "легенде" **двухполюсную** конструкцию (рис. 3). Цепь р-п-конденсатора (вход основных носителей р-п-четырёхполюсника) соединена **параллельно** с цепью **мощного управляемого "инжектора"** неосновных носителей (выход р-п-четырёхполюсника, рис. 4, а). 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") болцмановскую функцию экспоненциальной зависимости величины "инжекционного" тока от высоты потенциального барьера (ВАХ-диода).

● ● В **биполярном транзисторе** неосновные носители, разделяемые "мембраной-коллектором", "покидают" свою пару и канализируются в организованную для них специальную электрическую (коллекторную) цепь (I_k , рис. 4 б). Однако "покинутые" основные носители, как иногда говорят, не "уходят обратно на электрод базы", а обретают возможность **накапливаться** в области пространственного заряда и начинают оказывать влияние на "парадоксальную" ситуацию (рис. 5).

Суть в том, что ненасыщаемый при отсутствии рекомбинации режим "черной дыры" р-п-конденсатора связан с удалением на бесконечную нейтрализацию неравновесного медиатора из области обедненного ионного слоя, потенциал которого не в состоянии сравниться с напряжением внешнего источника U . Как только режим опеки неосновных носителей посредством коллектора блокируется, потерявшие "фискальную" работу основные носители приступают к заряду входного р-п-конденсатора. Потенциал внутри перехода и ожидаемое напряжение на внешних контактах выравниваются, ток во входной це-

пи (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 - $I_k \approx I_s = I_s (\exp^{U/U_T} - 1)$.

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** [3]. Физической характеристикой усилительных свойств биполярного транзистора, таким образом, является **крутизна** прямого преобразования тока коллектора с точностью до рекомбинационных потерь "инжекционного" тока 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, которое по сложившейся легенде определяется 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?

"Таким образом, чувствительность обратного тока к неосновным носителям (эффект собирания носителей, экстракция или "коллекция" носителей) в сочетании с эффектом инжекции носителей, возникающим в другом переходе, и составляет фундаментальный принцип действия плоскостного транзистора. Вопрос в том, как именно осуществляется инжекция источником эмиссии, становится уже чисто техническим. В частности, в качестве такого источника можно использо-

вать р-п-переход, смещенный в прямом направлении и инжектирующий носители заряда, которые образуют "диффузионный хвост" [9].

Как бы парадоксально это ни звучало, но **внешний** силовой ток цепи не протекает через переход, то есть 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

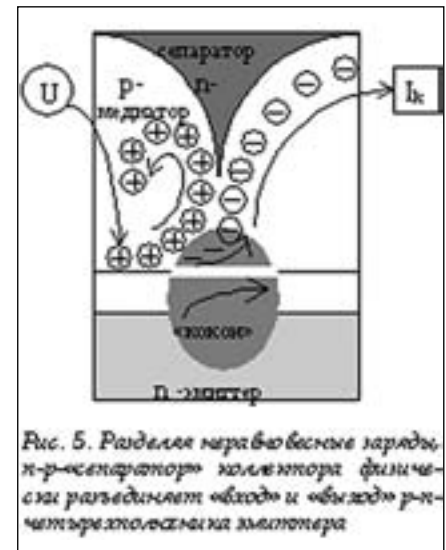


Рис. 5. Разделяя неравновесные заряды, р-п-сепаратор коллектора физически разделяет «вход» и «выход» р-п-четырёхполюсника эмиттера

в том, что обычно под "инжекцией" в "легенде" подразумевается режим диффузионного преодоления принудительно понижаемого потенциального барьера (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-перехода.

● 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 "коконе"



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 (λ) электрона шагу кристаллической решетки (а), по определению **И. П. Степаненко**, " $\lambda = a$ имеет место своеобразный резонанс, когда внешнее поле "не действует" на электрон, то есть $m' = \infty \dots$ " [7, с. 14], где m' - эквивалентная масса электрона.

Реально прямое дифференциальное сопротивление пропорционально обратной величине прямого тока цепи, но и это не тот ток, который может образоваться в переходе падение напряжения в омическом смысле. Напряжение и ток в выражении $I = I_s (e^{U/U_t} - 1)$ относятся к абсолютно **разным** цепям "черного ящика" - активного 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 $r_c = 1/S_c$, где $S_c = I_c q/kT$ - **крутизна прямого преобразования р-п-четырёхполюсника как инжектора**. Достаточно сказать, что при токе во внешней цепи диода $I_c = 10$ мА крутизна прямого преобразования внутреннего четырёхполюсника р-п-инжектора равна $S_c \approx 385$ мА/В, при токе 1 А - $S_c \approx 38,5$ А/В. То есть энергетическая структура "кокона" может обеспечить любой ток внешней цепи при незначительном приращении управляющего (прямого) напряжения на входе р-п-четырёхполюсника (ΔU_{pm}).

То, что называют падением напряжения U_{pn} , связано с входной цепью внутреннего р-п-четырёхполюсника. В идеальном случае это напряжение входного р-п-конден-

сатора, "зарегулированного" выходной цепью р-п-инжектора, в реальном - напряжение "**входного диода**", шунтируемого выходной цепью р-п-инжектора.

"Входной диод" биполярного транзистора

Очевидно, 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 несвязанными 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 четырёхполюсник с коэффициентом прямого преобразования напряжение-ток и усилением по мощности, **существенно** превышающим единицу.

Так образ мембраны делает узнаваемым существо четырёхполюсной структуры р-п-перехода. **Здесь самое время снять все связанные с идеализацией ограничения на время жизни неосновных носителей заряда ("рабочего тела") в р-п-системе**. Вход и выход активного ($S_c = I_c q/kT$) 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 обед-

ненном 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 миниатюре повторяет все свойства запараллеленного четырёхполюсника. Здесь выход инжектора делится на два канала, один из которых питает цепь коллектора, второй - шунтирует входной р-п-конденсатор в "просто" входном диоде.

Таким образом, усиление биполярного транзистора (к слову, сокращенное от transfer resistor - преобразующий сопротивление) обуславливает не "transfer" коллектор [9], а "active" р-п-эмиттер.

Эпилог

Итак, осознанная необходимость подтверждается возможностью качественно новой интерпретации существующих фактов в плоскости объяснения не учитывавшихся ранее факторов и явлений, лежащих в основе принципа действия "черного ящика" р-п-перехода. Установлены функциональная структура и принцип действия р-п-перехода! Что дальше?

Речь в конечном итоге идет всего лишь о конструктивной и, видимо, вполне назревшей концепции, позволяющей преодолеть сложившиеся стереотипы. При определенной адаптации открываемый пласт качественно новых представлений мог бы, вероятно, иметь продолжение в грядущей молекулярной электронике и, возможно, других областях знаний, учитывающих потенциальные термодинамические явления на границе раздела электропроводных (молекулярных) сред.

Знание априори оставшейся вне парадигмы количественной теории р-п-перехода такой сущности, как явление активности р-п-переходного слоя, судя по всему, не стало бы определяющим фактором в истории триумфального шествия твердотельной микроэлектронной техники. Суть, однако, в том, что по стечению обстоятельств именно

"тривиальный" полупроводниковый диод оказался местом средоточия не учитывавшихся ранее и без преувеличения глобальных проявлений материального мира.

Достаточно сказать, что твердотельный диод есть не просто некоторым способом легированный полупроводниковый кристалл с нелинейными электрическими (вентильными) свойствами - двухполосник, как его интерпретирует "Физика твердого тела". Это структура, эквивалентная функционально замкнутому с "выхода" на "вход" активному электрическому р-п-четырёхполоснику с феноменальной крутизной прямой передачи, величина которой $S_e = I_c q / kT$ определяется только **мощностью** внешней цепи (током I_c) и известными физическими константами T , k и q .

Очевидно, свойство усиления "внутреннего" р-п-четырёхполосника не является признаком конструкции и относится к случаю закономерных природных явлений, а следовательно, в том или ином виде может проявляться в других, подобных электронно-дырочному переходу структурах и взаимодействиях. При определенном стечении обстоятельств такой внутренний активный "четырёхполосник" на границе некоторых электропроводных сред может быть разомкнутыми функционировать как эффективный усилитель (преобразователь) электрических величин (усилитель мощности), например, 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 механизм контроля энергии фона в р-п-переходе на макро- и микроуровнях, по сути, вероятно, проявляется в явлении катализа и др.

Именно электронно-дырочный прообраз явления естественной мембранной активности на границе раздела некоторых капельно-пленочных сред [18] 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 стабильные эволюционные состояния стихийного зарождения (проб и ошибок) пробиянтов любого толка [15], а в качестве основы принципа каталитических реакций - как достаточное условие закономерности и неизбежности этапов эволюционно-химических процессов воспроизводства жизни в благоприятных условиях [19].

Новые представления, в частности, вносят определенность в затянувшиеся научные споры вокруг якобы исчезающе малой математической вероятности, вплоть до отрицания всякой материалистической возможности [20] не созидательного начала жизни на Земле. В природе существуют готовые механизмы для **СТИХИЙНОГО** возникновения таких вещей, как управляемые, чувствительные к внешним факторам активные контакты (протомембраны).

Литература

1. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых устройствах. М.: Атомиздат, 1969.
2. Поляков В. А. К вопросу идеологии биполярного транзистора (радиационный ресурс) // Радиопромышленность, 2000. Вып. 2. С. 61-76.
3. Поляков В. А. К вопросу идеологии электронно-дырочного перехода (о принципе действия биполярного транзистора) // Радиопромышленность, 2000, Вып. 2. С. 77-97.
4. Поляков В. А. К вопросу идеологии поверхностных состояний вещества (электронно-дырочный переход, живые мембраны) // Радиопромышленность, 2000, Вып. 4. С. 31-75.
5. Пауль Р. ТРАНЗИСТОРЫ. М.: Советское радио, 1973.
6. Матосов М. В. Физика работы выхода электрона. М.: Издательство МАИ, 1989.
7. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1973.

8. Спиридонов Н. С. Основы теории транзисторов. Киев: Техника, 1975.

9. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1970.

10. Горбачев В. В., Спицына Л. Г. Физика полупроводников и металлов. М.: Металлургия, 1982.

11. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1974.

12. Фистуль В. И. Введение в физику полупроводников. М.: Высшая школа, 1975.

13. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.

14. Под редакцией Кривицкого Б. Х., Дулина В. Н. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Т. I. М.: Энергия, 1977.

15. Подборка статей о происхождении и эволюции жизни // ЖВХО им. Д.И. Менделеева, 1980. Т. XXV. № 3,4.

16. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: МИР, 1977.

17. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.

18. 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.

19. Руденко А. П. Эволюционная химия и естественноисторический подход к проблеме происхождения жизни // ЖВХО им. Д.И. Менделеева, 1980. Т. XXV. № 4. С. 390.

20. Бен Хобринк ЭВОЛЮЦИЯ. М.: Мартис, 1993.

Поправка

В статью "Феномен р-п-структуры", напечатанной в №4(34), вместо рисунка 2, был размещен другой.

Приводим нужный рисунок и приносим свои извинения читателям.

