

Устройства функциональной электроники

Функциональная полупроводниковая электроника

Динамические неоднородности. Домен Ганна

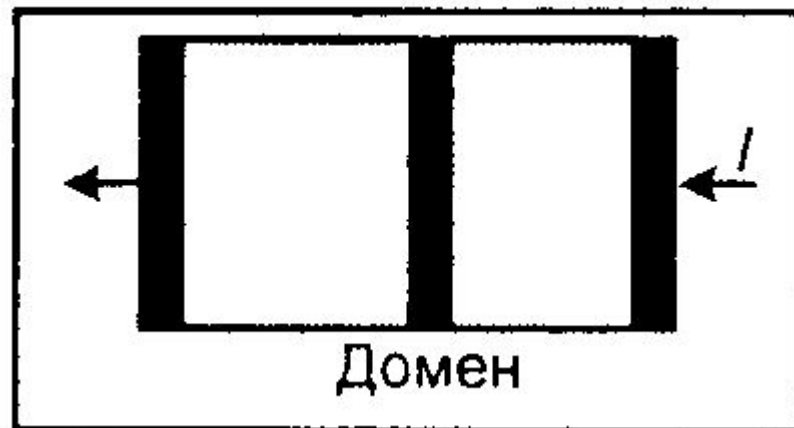
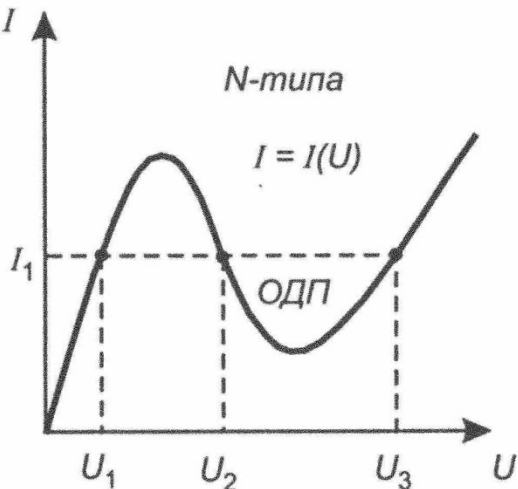
Одними из динамических неоднородностей ФПЭ являются домены Ганна, которые возникают в полупроводниках с **отрицательной дифференциальной проводимостью** (отрицательным дифференциальным сопротивлением).

Отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) возникает в некоторых полупроводниковых материалах, имеющих N-образную ВАХ, где в сильных электрических полях, когда носителя заряда сильно разогреваются и наблюдается

Домены Ганна — динамические неоднородности, являющиеся областью пространственного заряда, связанные с флуктуацией концентрации свободных носителей заряда.

Эти домены характеризуются тем, что их поле значительно больше, а концентрация носителей в них меньше, чем в остальной части полупроводниковой среды.

Линейные размеры таких доменов лежат в пределах нескольких микрон, скорость перемещения составляет порядка 10^5 м/с, электрическое поле в нем достиж



Функциональная полупроводниковая электроника

Отрицательная дифференциальная проводимость

В слабых электрических полях носители заряда на расстоянии длины свободного пробега (между столкновениями) приобретают скорость v_E , которая много меньше их тепловой скорости v_T

$$v_E \ll v_T.$$

В этом случае проводимость μ не зависит от напряженности электрического поля

$$\mu = \frac{E}{v_E} = const.$$

Поскольку в этих же полях электрическое поле не может изменить и концентрацию носителей, то проводимость $\sigma = en\mu$ не зависит от E и выполняется закон Ома

$$\vec{J} = en\mu \cdot \vec{E}.$$

В сильных полях, когда скорость v_E сравнима или больше тепловой скорости v_T происходит «разогрев» электронного газа. В этом случае подвижность электронов становится функцией величины электрического поля $\mu = \mu(E) \neq const.$

Если основной механизм рассеивания электрон-фононный (рассеяние происходит тепловых колебаниях решетки), то

$$\mu \sim E^{-1/2}.$$

Если основной механизм рассеивания примесный (рассеяние происходит на атомах примеси), то

$$\mu \sim E^{3/2}.$$

Таким образом в сильных электрических полях подвижность может и увеличиваться и уменьшаться с увеличением E .

Функциональная полупроводниковая электроника

Отрицательная дифференциальная проводимость

Зависимость плотности тока от напряженности становится нелинейной даже при постоянной концентрации носителей заряда

$$\vec{J} = en\mu(E) \cdot \vec{E}.$$

В этом случае закон Ома перестает выполняться и проводимость в этом случае определяется как **дифференциальная проводимость** σ_D :

$$\sigma_D = \frac{dj}{dE}.$$

В нашем случае $\sigma_D = \frac{dj}{dE} = en\mu(E) + enE \cdot \frac{d\mu(E)}{dE}$. Возможны 2 варианта:

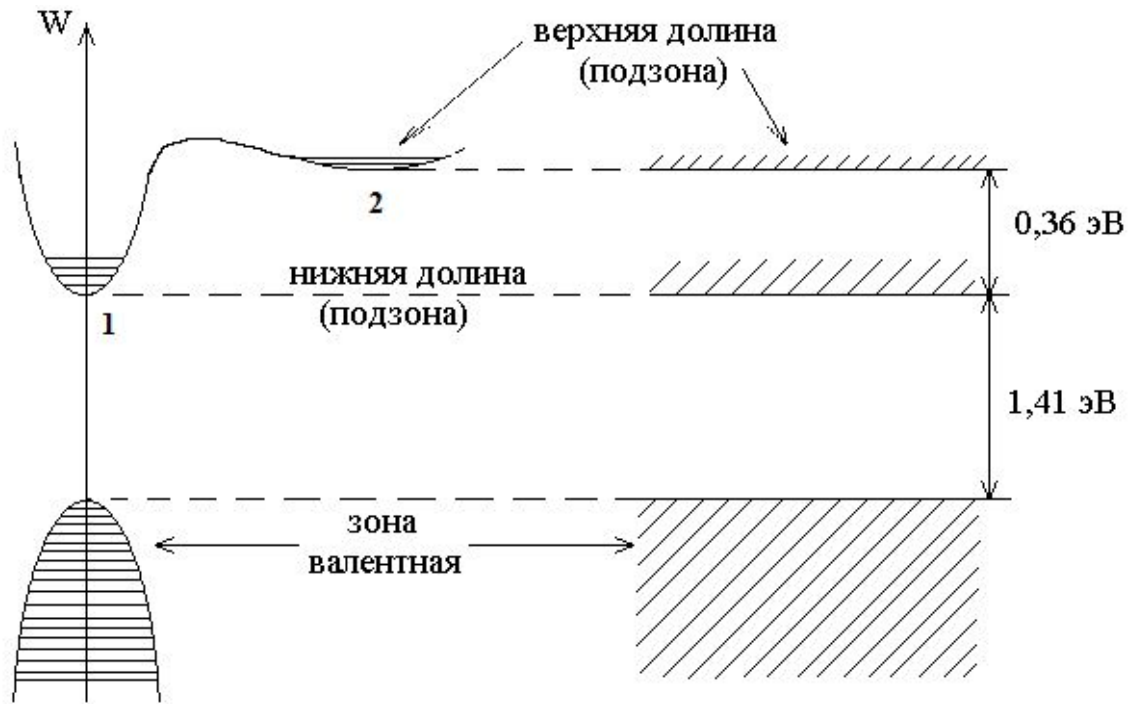
- 1) если подвижность увеличивается с ростом E (т.е. $\frac{d\mu(E)}{dE} > 0$) или подвижность уменьшается с ростом E (тогда $\frac{d\mu(E)}{dE} < 0$) и $\left| \frac{E}{\mu} \frac{d\mu(E)}{dE} \right| < 1$, то $\sigma_D > 0$;
- 2) подвижность уменьшается с ростом E (т.е. $\frac{d\mu(E)}{dE} < 0$) и $\left| \frac{E}{\mu} \frac{d\mu(E)}{dE} \right| > 1$, то $\sigma_D < 0$.

Второй случай и реализуется при междолинных переходах в $GaAs$. Только при этом и концентрация носителей не остается постоянной $n = n(E)$.

Функциональная полупроводниковая электроника

Междолинные переходы

Упрощенная зонная диаграмма $GaAs$



Зона проводимости имеет несколько долин (минимумов). Благодаря этому электроны в зоне проводимости могут находиться в различных энергетических состояниях – либо в основном минимуме (долине), или в побочном, отстоящем для $GaAs$ от основного примерно на величину 0,36 эВ. Таким образом зона проводимости как бы состоит из нескольких подзон.

Электроны, находящиеся в нижней подзоне, имеют меньшую энергию («холодные» электроны), а в верхней подзоне – большую («горячие» электроны). При этом эффективная масса и подвижность «холодных» и «горячих» электронов разная:

- $m_{1эфф} = 0,07 m_0$ («легкие», но «холодные» электроны), а в верхней (боковом минимуме) $m_{2эфф} = 1,2 m_0$ («тяжелые», но «горячие» электроны), m_0 – масса свободного электрона;
- для «холодных» электронов $\mu_1 = 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а для «горячих» – $\mu_2 = 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Функциональная полупроводниковая электроника

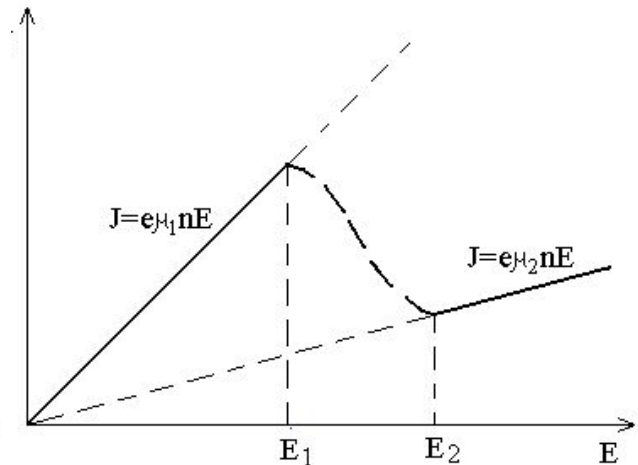
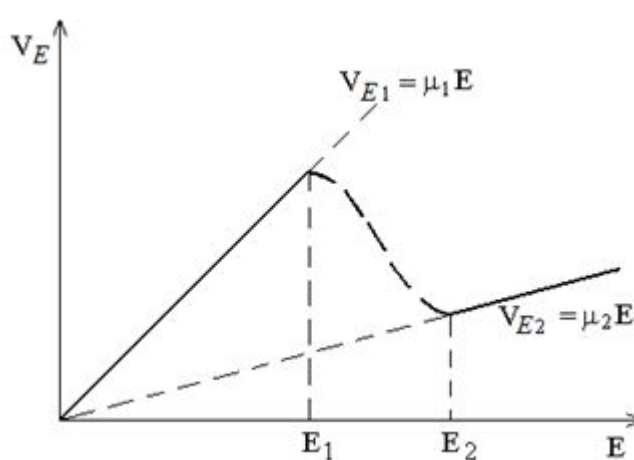
Междолинные переходы

Обозначим концентрацию «легких» электронов n_1 , а «тяжелых» n_2 . Тогда концентрация электронов $n = n_1 + n_2$.

При слабом внешнем электрическом поле почти все электроны зоны проводимости находятся в нижней подзоне, то есть $n_2 = 0, n_1 = n_0$. Дрейфовая скорость электронов $v_{E1} = \mu_1 E$, то есть изменяется линейно с ростом E .

Плотность тока: $j = e(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2)E = e\mu_1 n_0 E = en_0 v_{E1}$, то есть так же растет линейно с ростом напряженности поля.

При возрастании внешнего поля до величины $E > E_1$ (для арсенида галлия $E_1 = 3 \cdot 10^3$ В/см одновременно с начинают сказываться эффекты, связанные со столкновениями электронов с узлами кристаллической решетки, из-за чего повышается температура электронного газа и электроны получают возможность перейти в верхнюю долину.



При значении внешнего поля $E \approx E_2$ (обычно $E_2 > 2E_1$) практически все электроны окажутся в верхней долине ($n_1 \approx 0$). Дрейфовая скорость электронов соответственно равна: $v_{E2} = \mu_2 \cdot E$, а плотность тока – $j = e\mu_2 n_2 E = e\mu_2 n_0 E = en_0 v_{E2}$.

Функциональная полупроводниковая электроника

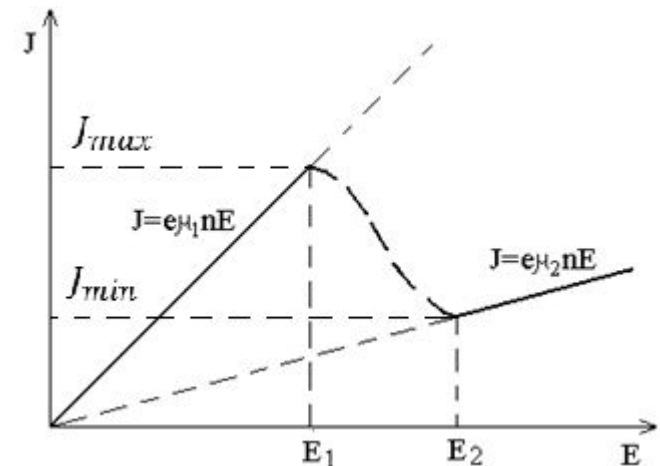
Домены Ганна

На участке $E_1 < E < E_2$ должны наблюдаться уменьшение средней дрейфовой скорости и спад плотности тока при росте напряженности внешнего поля (**отрицательная дифференциальная подвижность и отрицательная дифференциальная проводимость**)

Такой вид графиков будет наблюдаться, если переход электронов из нижней энергетической подзоны в верхнюю будет происходить одновременно по всему объему полупроводника.

Экспериментальное исследование образцов из указанных выше полупроводников с примесью n -типа показало, что интенсивный междолинный переход электронов происходит не по всему объему образца, а в некоторых областях, в первую очередь там, где имеются неоднородности.

Даже в химически однородных образцах из-за наличия омических контактов будут возникать области с повышенными значениями напряженности поля (флуктуациями электрического поля), и, следовательно, вблизи контактов в первую очередь возникает междолинный переход электронов.



Функциональная полупроводниковая электроника

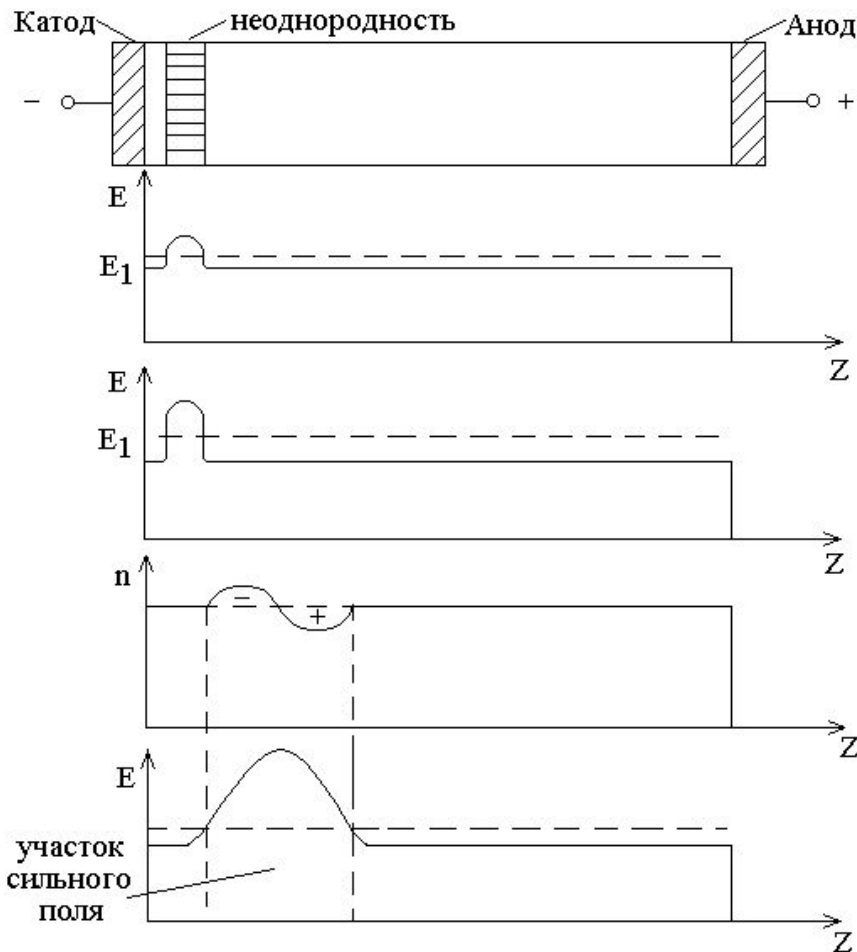
Домены Ганна

Домены Ганна используются в диодах Ганна, представляющих собой полупроводник с двумя омическими контактами, один из которых выполняет роль анода, второй – роль катода.

Из-за малого времени взаимодействия электронов с полем неоднородность вблизи анодного контакта практически не влияет на процессы в образце. Влияние на процессы оказывает только **неоднородность вблизи катода**.

При увеличении электрического поля именно вблизи катода создаются благоприятные условия для перехода электронов в верхнюю подзону (долину) с одновременным резким уменьшением дрейфовой скорости.

Переход некоторого количества электронов в верхнюю подзону приведет к **увеличению сопротивления этого участка образца, что ведет к дальнейшему увеличению электрического поля на этом участке** и уменьшению поля слева и справа от участка. Увеличение поля на «горячем участке» ведет к увеличению числа «горячих» электронов.



Функциональная полупроводниковая электроника

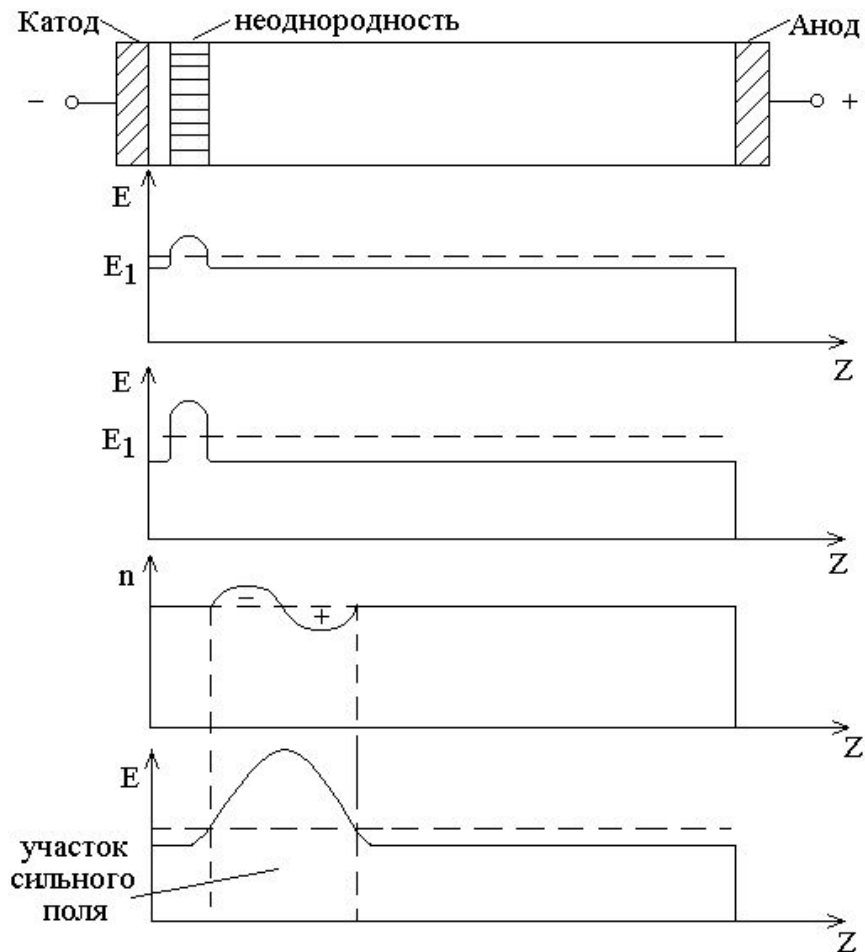
Домены Ганна

Независимо от того, являются ли электроны «горячими» или «холодными», все они движутся к аноду.

При движении к аноду в участок с «горячими», но медленными электронами будут вливаться слева догоняющие их быстрые электроны, увеличивая концентрацию электронов на «горячем участке». «Холодные» электроны, двигавшиеся справа от слоя горячих, быстро уходят в отрыв, обеспечивая преобладание положительных зарядов кристалла (донорных ионов) непосредственно перед слоем «горячих» электронов.

Таким образом, движение «горячих» и «холодных» электронов приводит к **формированию подвижного двойного электрического слоя зарядов – домена**.

Появление двойного электрического слоя дополнительно увеличивает напряженность поля в доменной области и еще более способствует переходу электронов в верхнюю долину.



Функциональная полупроводниковая электроника

Домены Ганна

Формирование домена продолжается до тех пор, пока все электроны в этой области не станут «горячими» и не произойдет выравнивание дрейфовых скоростей электронов, движущихся в составе домена и вне его

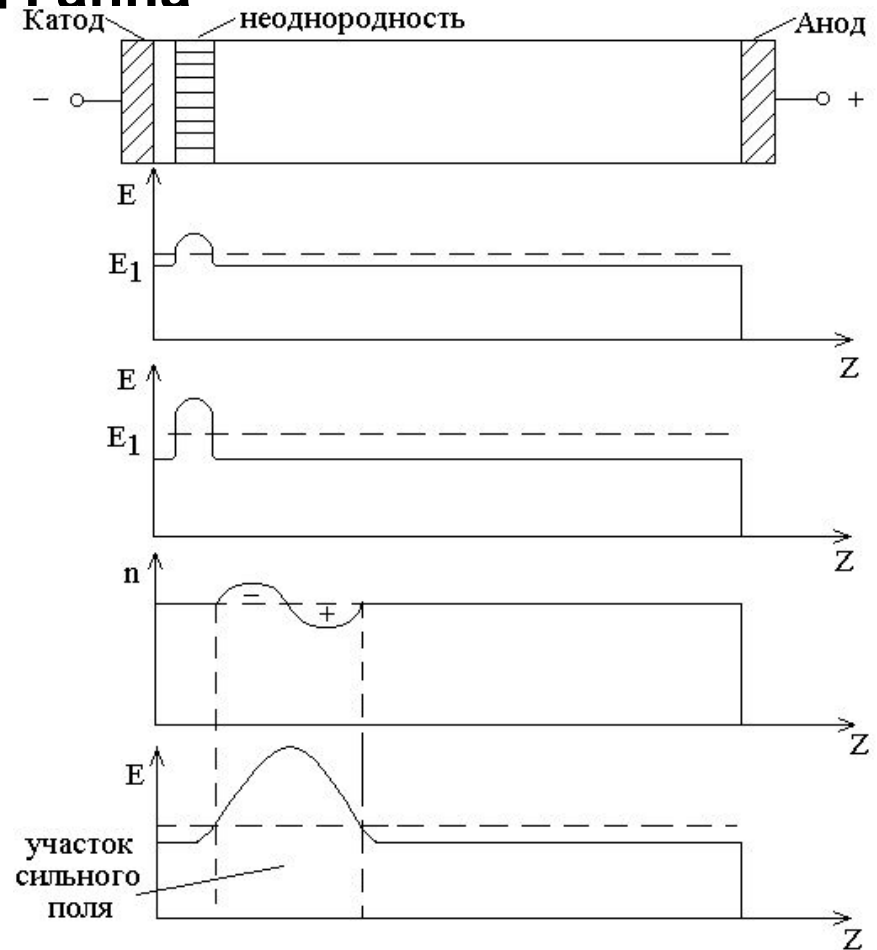
$$v_{E1} = \mu_1 E_1 = v_{E2} = \mu_2 E_2.$$

Выравнивание происходит за счет значительного ослабления электрического поля за пределами домена. После выравнивания скоростей концентрация электронов, а также дрейфовая скорость не изменяются, то есть формирование домена закончилось. Время формирования домена

$$t_{\phi} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ с.}$$

Ток в цепи полупроводникового образца в течении всего времени движения домена от катода к аноду остается практически постоянным.

При достижении анода домен рассасывается, общее сопротивление образца уменьшается и ток возрастает, однако рассасывание домена у анода создает возможность для формирования нового домена у катода и процесс повторяется.



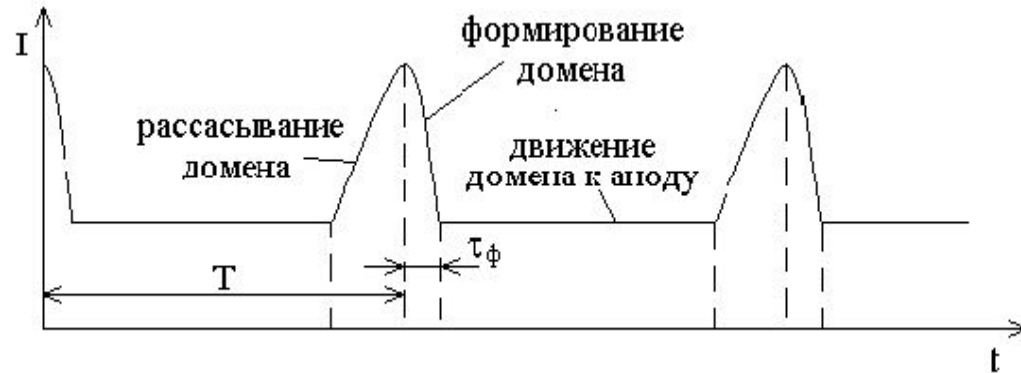
Функциональная полупроводниковая электроника

Дом — Ганна

В результате ток через образец будет претерпевать периодические изменения с частотой:

$$f = f_{\text{пр}} = \frac{v_E}{L},$$

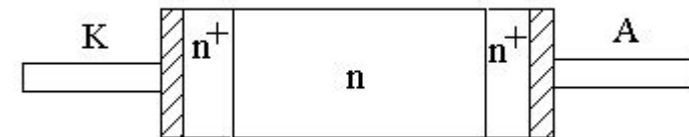
где L — длина образца, v — дрейфовая скорость, $f_{\text{пр}}$ — пролетная частота.



Для полупроводниковых образцов типа *GaAs*:

- участки образца вне домена ведут себя как обычная среда, проводимость которой подчиняется закону Ома;
- участок образца внутри домена обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением, что позволяет использовать образцы в качестве активных элементов усилителей и генераторов СВЧ.

Такие полупроводниковые образцы используются для создания диодов Ганна, представляющих собой полупроводниковый кристалл с двумя омическими контактами для внешних выводов. Полупроводник имеет донорную примесь с концентрацией $n = 10^{14} - 10^{16} \text{ 1/см}^3$.



Так как полупроводники, в которых проявляется эффект Ганна, при контакте с металлами обычно образуют барьер Шоттки, то для организации нормального омического контакта формируются дополнительные слои n^+ с концентрацией $10^{18} - 10^{19} \text{ 1/см}^3$.

Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Пролетный режим диода Ганна

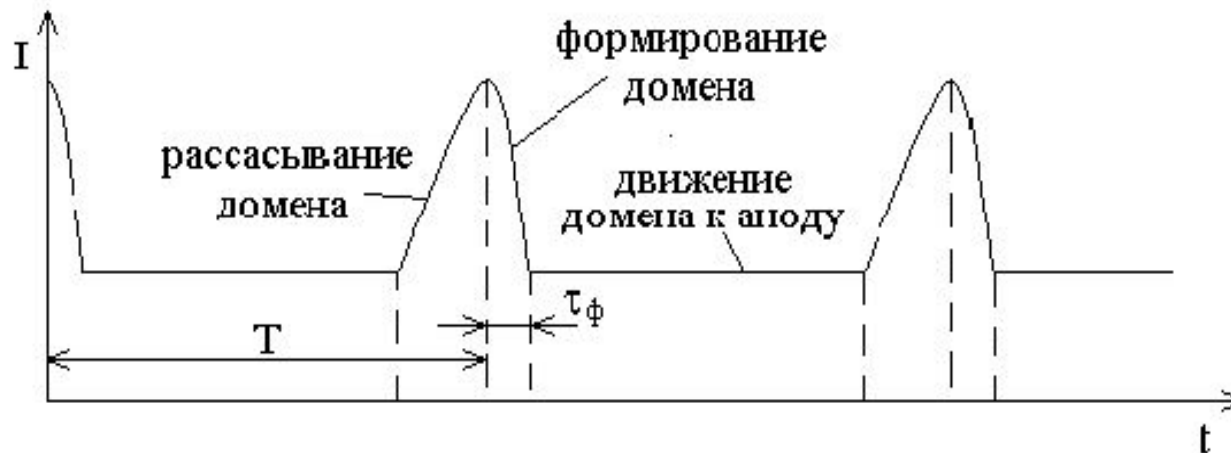
Этот режим полностью соответствует описанному выше эффекту Ганна.

При этом генерируемая частота приблизительно равна пролетной частоте.

Активная часть диода Ганна (n -слой) имеет длину $L = 10 - 100$ мкм, диаметр $d = 50 - 250$ мкм и более.

При $L = 100$ мкм и $v_E = 10^5$ м/с частота $f = \frac{v_E}{L} = 10^9$ Гц = 1 ГГц.

При $L = 10$ мкм и $v_E = 10^5$ м/с частота $f = \frac{v_E}{L} = 10^{10}$ Гц = 10 ГГц.



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Режим с ограниченным накоплением объемного заряда (ОНОЗ)

Для работы в этом режиме кроме постоянного напряжения подается синусоидальное напряжение.

При достаточно высокой частоте колебаний домен не успевает сформироваться, ток через образец будет периодически изменяться, уменьшаясь при увеличении U свыше $U_{\text{п}}$ и увеличиваясь при уменьшении U ниже $U_{\text{п}}$.

При $t < t_1$ ($U > U_{\text{п}}$) будет формироваться домен – ток будет уменьшаться.

При $t > t_1$ ($U < U_{\text{п}}$) домен будет рассасываться – ток будет увеличиваться.

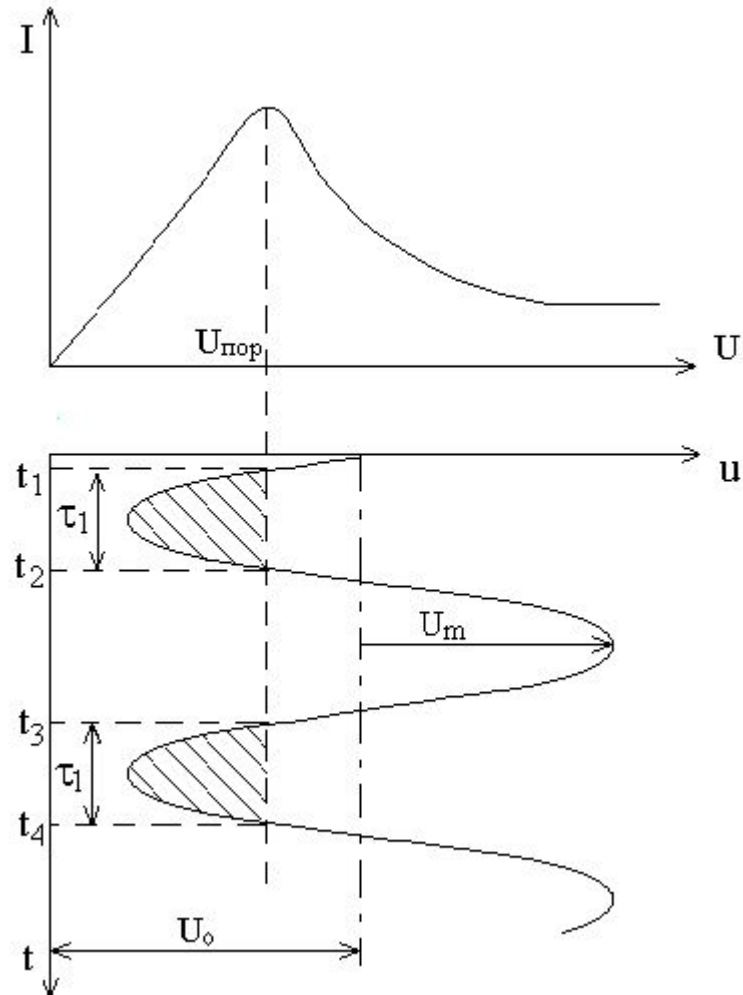
При $t > t_2$ ($U < U_{\text{п}}$) домен снова будет формироваться – ток будет уменьшаться.

Таким образом, колебания тока будут происходить с «навязанной» частотой, на не с $f_{\text{пр}}$.

Нужно, чтобы период синусоидального сигнала T был меньше времени формирования домена $T < \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{en_0\mu_2}$.

С другой стороны период должен быть много больше времени исчезновения домена $T \gg \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{en_0\mu_1}$.

Формирование домена в объеме полупроводника должно быть затруднено. Это обеспечивается технологически путем максимального исключения возможных неоднородностей, то есть использования сверхчистых однородных кристаллов.



Функциональная полупроводниковая электроника

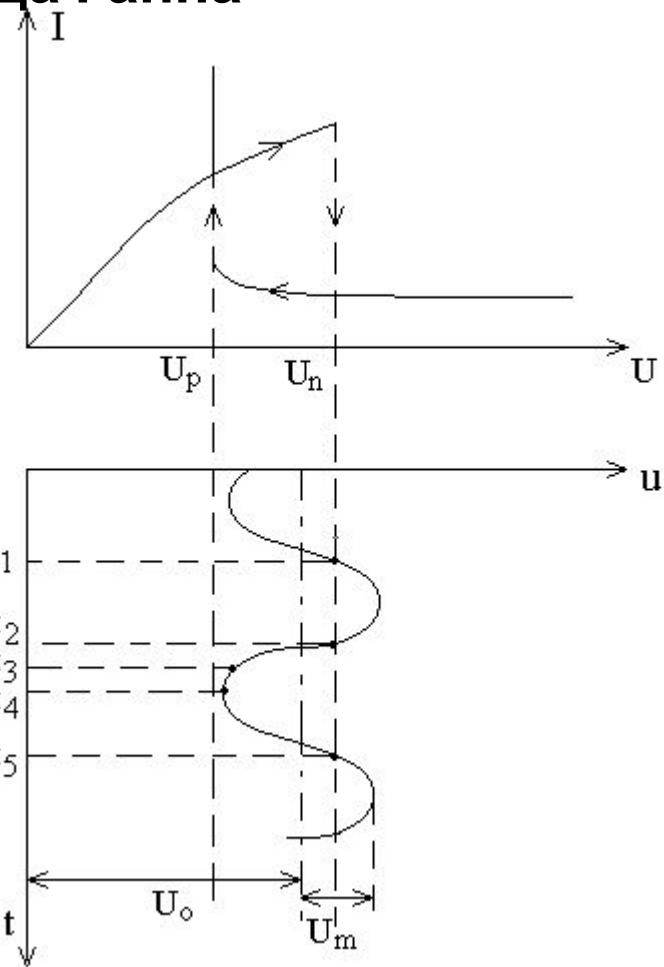
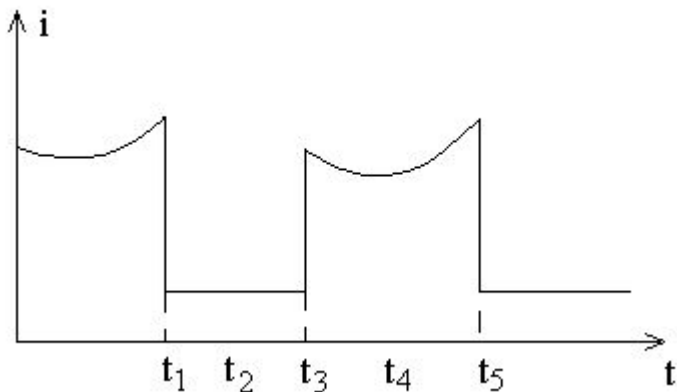
Устройства на основе диода Ганна Режим с задержкой образования домена

Этот режим реализуется при $f < f_{пр}$.

Для этого режима $U_0 - U_m > U_p$, то есть после возникновения домен может исчезнуть только при достижении анодного контакта.

В момент t_1 $U \approx U_{п}$ и домен образуется и начинает двигаться к аноду. Ток в этот момент падает до минимального значения и остается практически постоянным в течение всего времени движения домена (время движения домена должно быть меньше периода колебаний). Рассасывание домена происходит при достижении доменом анодного контакта (t_3).

Отрицательное дифференциальное сопротивление диода будет обеспечиваться, если момент прихода домена на анод (момент рассасывания домена) лежит в пределах $t_2 - t_4$. С одной стороны в момент рассасывания напряжение должно быть меньше порогового, а с другой – напряжение в момент рассасывания домена должно уменьшаться. При рассасывании домена ток увеличивается (диод Ганна в этот момент является устройством с ОДП). Новый домен образуется не сразу, а в момент t_5 , когда $U \approx U_{п}$. В этот момент диод также ведет себя как устройство с ОДП, так как напряжение увеличивается, а ток при образовании домена уменьшается.



- U_0 – постоянное напряжение, приложенное к диоду Ганна;
- U_m – амплитуда переменного напряжения;
- $U_{п}$ – пороговое напряжение, при котором возникает домен;
- U_p – напряжение, при котором рассасывается домен.

Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Режим с подавлением (гашением) домена

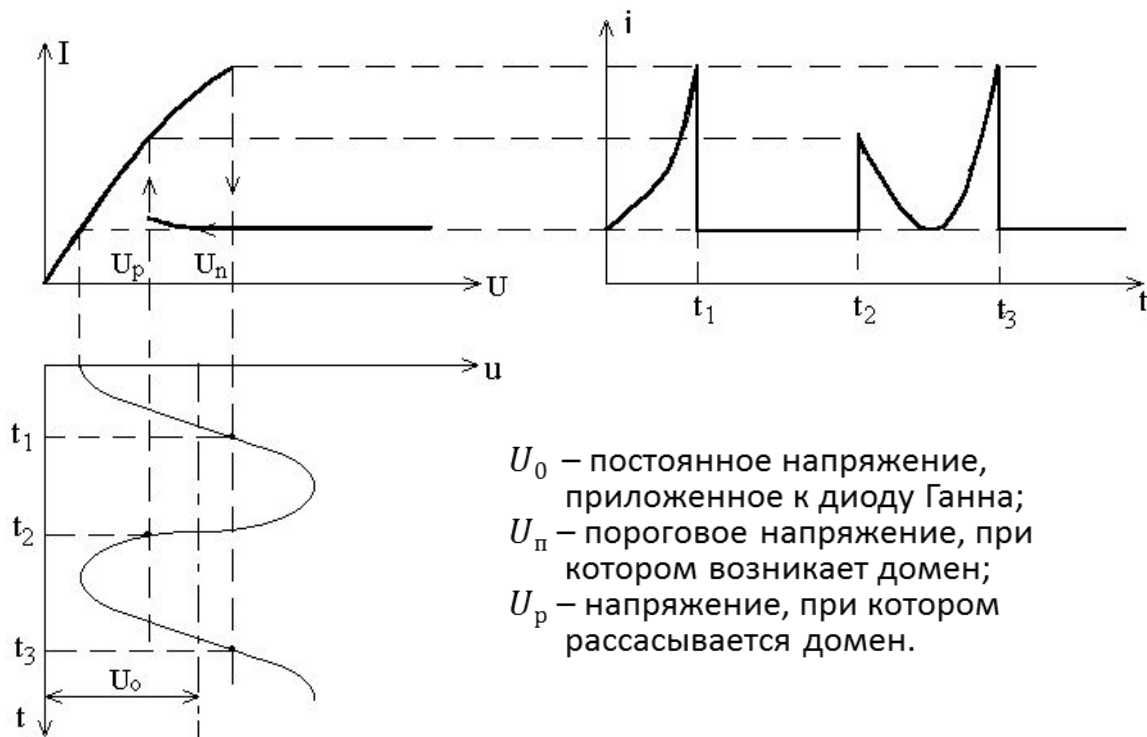
В этом режиме в течение части периода $U_0 - U_m < U_p$ и поэтому домен может расформировываться (рассасываться), не доходя до анода.

В момент t_1 ($U \approx U_{\Pi}$) домен возникает и существует до времени t_2 , когда $U = U_p$.

Время пролета домена от катода до анода должно быть больше той части периода, когда напряжение меняется от U_{Π} до U_p ($t > t_2 - t_1$), то есть домен еще не доходит до анода, когда напряжение уменьшается до U_p .

Новый домен возникает в момент t_3 и далее процесс повторяется. Рабочая частота в этом случае может изменяться в пределах:

$$0,75 f_{\text{пр}} < f_{\text{раб}} < (2 - 3) f_{\text{пр}}.$$



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Преобразователь частоты на диоде Ганна

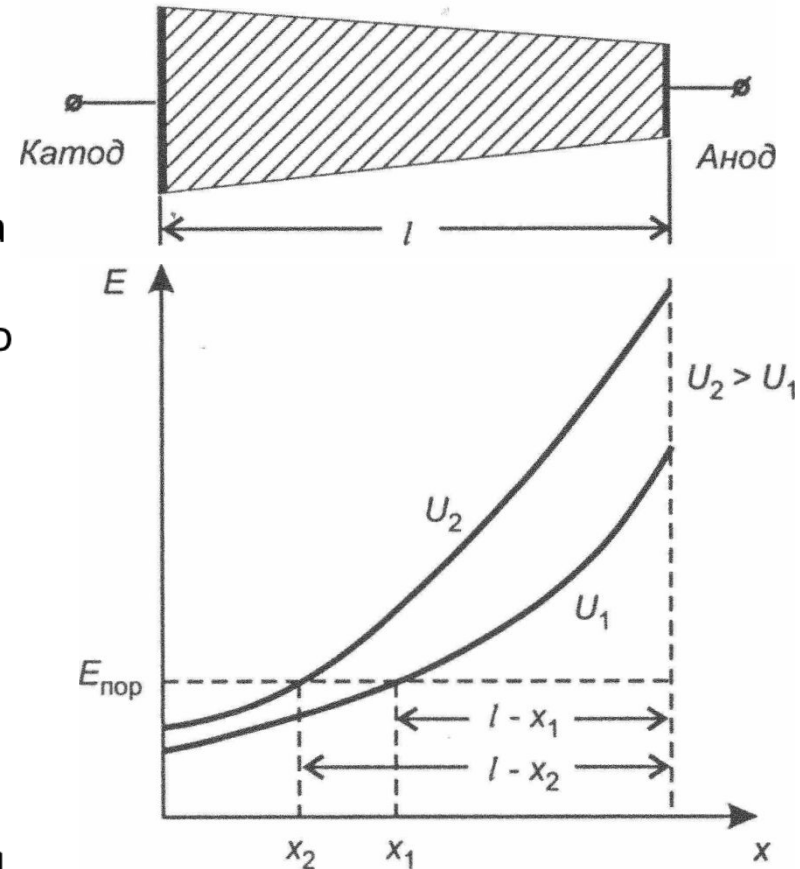
Для такого диода Ганна можно внешним напряжением перестраивать частоту генерации, регулируя точку достижения $U_{\text{п}}$ (место зарождения домена), поскольку при расширении от анода к катоду напряжение внутри домена растет от катода к аноду.

При напряжении U_1 напряженность электрического поля превышает $E_{\text{пор}}$ в части образца при $x > x_1$. Домен зарождается в области x_1 и проходит путь $l_1 - x_1$ так что частота генерации $f_1 = \frac{v_E}{l_1 - x_1}$.

При увеличении напряжения смещения $U_2 > U_1$ изменяется место зарождения домена. Пороговая напряженность электрического поля достигается в области x_2 , путь домена возрастает и частота генерации уменьшается $f_2 = \frac{v_E}{l_2 - x_2}$.

Таким образом, с увеличением приложенного к диоду напряжения частота генерации уменьшается.

Если создать диод Ганна, у которого площадь поперечного сечения монотонно увеличивается от катода к аноду, то частота генерации возрастает при увеличении напряжения смещения.



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Импульсные усилители на диоде Ганна

Поскольку пороговое напряжение зарождения домена U_{Π} выше напряжения его распада U_p , можно реализовать на диодах Ганна импульсный усилитель. Принцип его работы заключается в следующем, К диоду прикладывают постоянное смещение U , величина которого меньше U_{Π} , но больше U_p : $U_p < U < U_{\Pi}$. Если на вход подать небольшой по величине и длительности импульс ΔU так, что $\Delta U + U > U_{\Pi}$, то в диоде зарождается домен.

После затухания входного импульса домен сохраняется и дрейфует к аноду, поскольку постоянное смещение U превышает U_p .

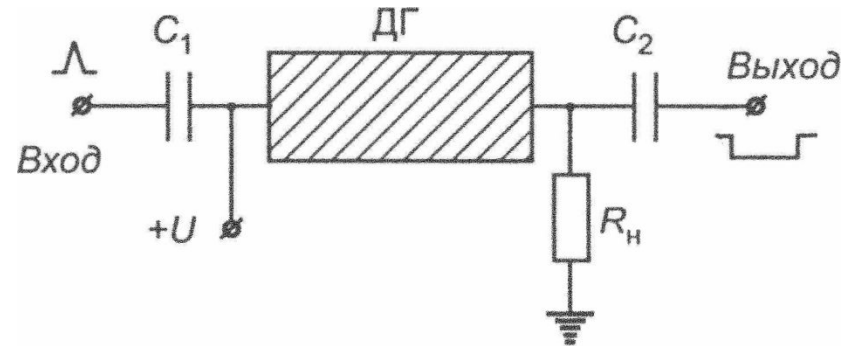
Амплитуда выходного импульса равна

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Н}} \Delta I \approx R_{\text{Н}} (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}),$$

где I_{max} , I_{min} – токи, соответствующие напряжениям U_{Π} и U_p .

На основе импульсного усилителя можно реализовать логические функции «ИЛИ», «И». Для этого необходимо ко входу добавить несколько параллельных электродов. Для реализации «ИЛИ» необходимо, чтобы входной сигнал, приложенный к любому из электродов, возбуждал домен сильного поля, а при выполнении функции «И» домен должен возбуждаться только при совместной подаче входного сигнала ко всем электродам.

Быстродействие таких логических устройств выше быстродействия аналогичных устройств на основе транзисторов или туннельных диодов, поскольку удельная емкость домена значительно меньше удельной емкости $p-n$ -переходов.



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диода Ганна

Генератор ультразвука на диоде Ганна

Арсенид галлия является пьезоэлектриком, поэтому электрическое поле приводит к деформации кристаллической решетки. В условиях ганновских осцилляций, когда электрическое поле изменяется во времени и пространстве вдоль образца, пьезоэффект приводит к переменной во времени и пространстве деформации, т. е. к возбуждению ультразвуковых колебаний.

Наиболее эффективно генерируются ультразвуковые волны в процессе зарождения домена сильного поля, когда вблизи катода в области порядка ширины домена электрическое поле изменяется от $E_{п} \sim 3$ кВ/см до $E_0 > 100$ кВ/см с частотой ганновских осцилляций. С такой же частотой генерируются ультразвуковые колебания. Основными преимуществами таких генераторов являются миниатюрность, широкий частотный диапазон и малая ширина ультразвукового потока.

В настоящее время промышленностью выпускаются различные типы диодов Ганна, предназначенные для усиления и генерации на частотах от 1 ГГц до 150 ГГц и более.

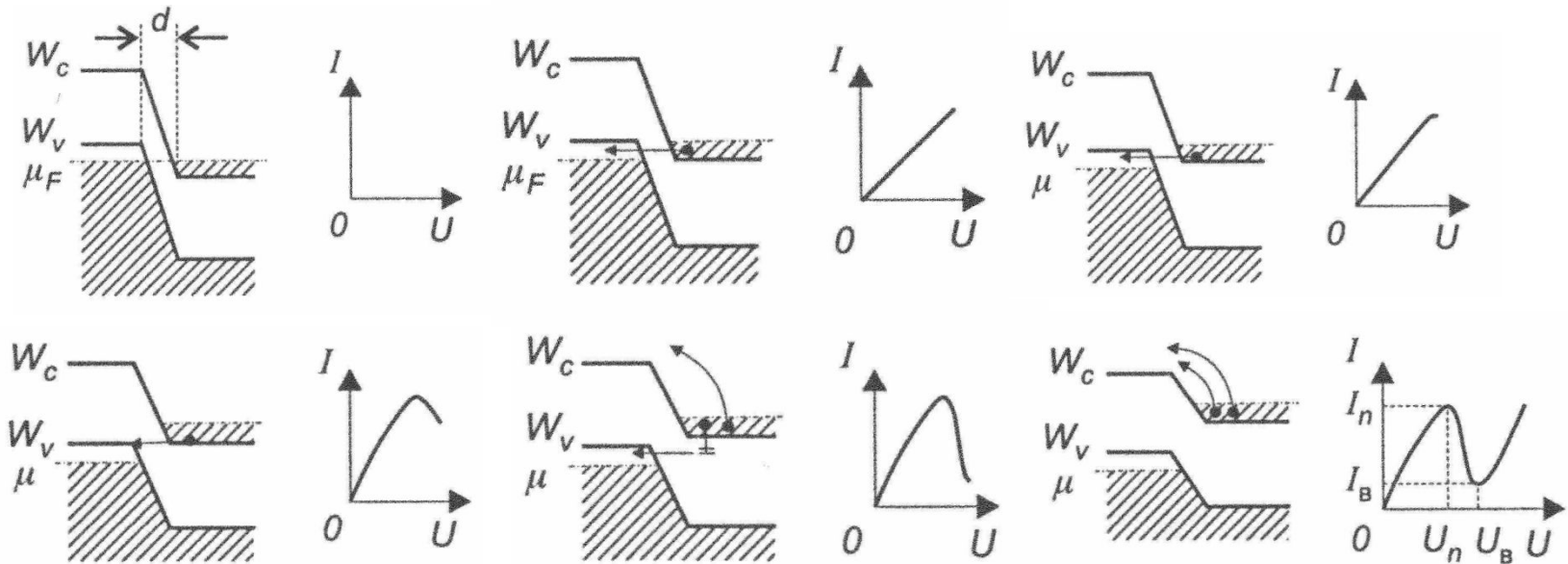
Для частот ниже 1 ГГц диоды Ганна не выпускаются, так как для работы на этих частотах промышленность освоила выпуск СВЧ транзисторов с хорошими показателями и гораздо лучшими функциональными возможностями.

Функциональная полупроводниковая электроника

Туннельные диоды

Туннельные диоды представляют собой диоды с сильнолегированными вырожденными n^+ и p^+ -областями. При образовании $p^+ - n^+$ -перехода в вырожденном полупроводнике искривление зон настолько сильное, что дно зоны проводимости материала n^+ -типа оказывается ниже потолка валентной зоны материала p^+ -типа.

Все энергетические состояния, лежащие ниже уровня Ферми, заполнены электронами, а выше – свободны. Из-за большой концентрации свободных носителей заряда ширина $p^+ - n^+$ -перехода d весьма мала, порядка 10^{-8} м. При таких расстояниях высока вероятность туннельных переходов электронов.



Функциональная полупроводниковая электроника

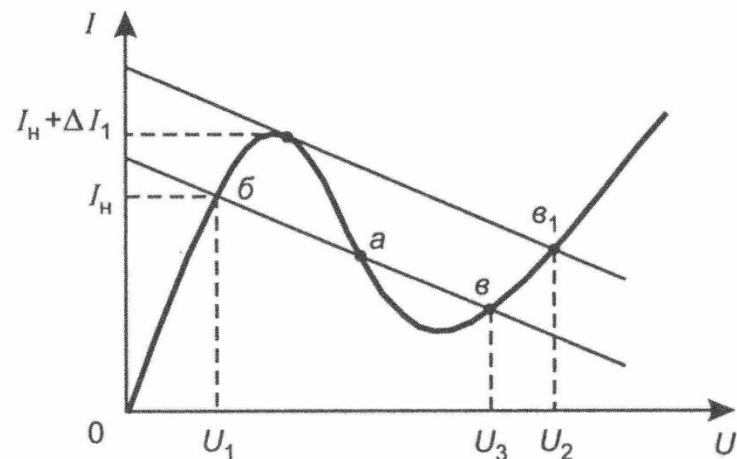
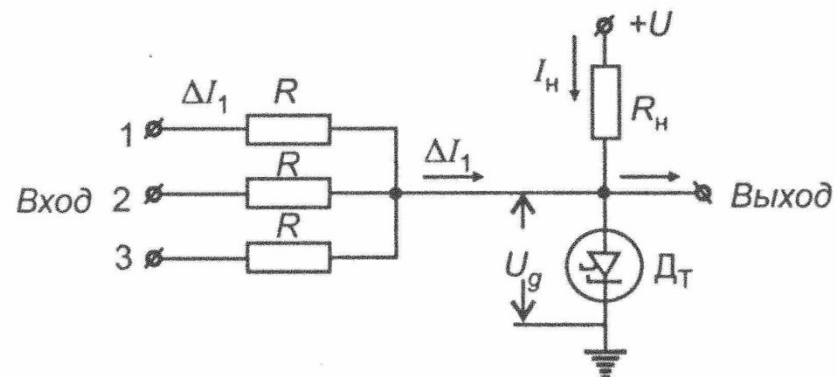
Устройства на туннельных диодах

Логические устройства на туннельных диодах. Логическое «ИЛИ»

Ток I_H определяется последовательно включенными сопротивлениями источника напряжения и нагрузки. Величину R_H подбирают такой, чтобы нагрузочная прямая пересекала вольт-амперную характеристику туннельного диода в трех точках, причем устойчивыми состояниями являются положение «в», соответствующее закрытому состоянию, и положение «б», соответствующее открытому состоянию диода.

В исходном положении система находится в состоянии «б» – открытом. При подаче сигнала ΔI_1 на вход нагрузочная прямая переместится вертикально вверх и устойчивому состоянию будет соответствовать единственное положение «в₁». Следовательно, на выходе будет скачок напряжения от U_1 до U_2 . При выключении сигнала ΔI_1 рабочая точка переместится из положения «в₁» в положение «в», которому соответствует напряжение U_3 .

Система будет в этом состоянии до тех пор, пока не будет отключен источник напряжения U или не будет подан на вход импульс отрицательной полярности. Такое переключение из открытого состояния «б» в закрытое «в» можно осуществить, подавая импульс на вход 1, или 2, или 3.



Функциональная полупроводниковая электроника

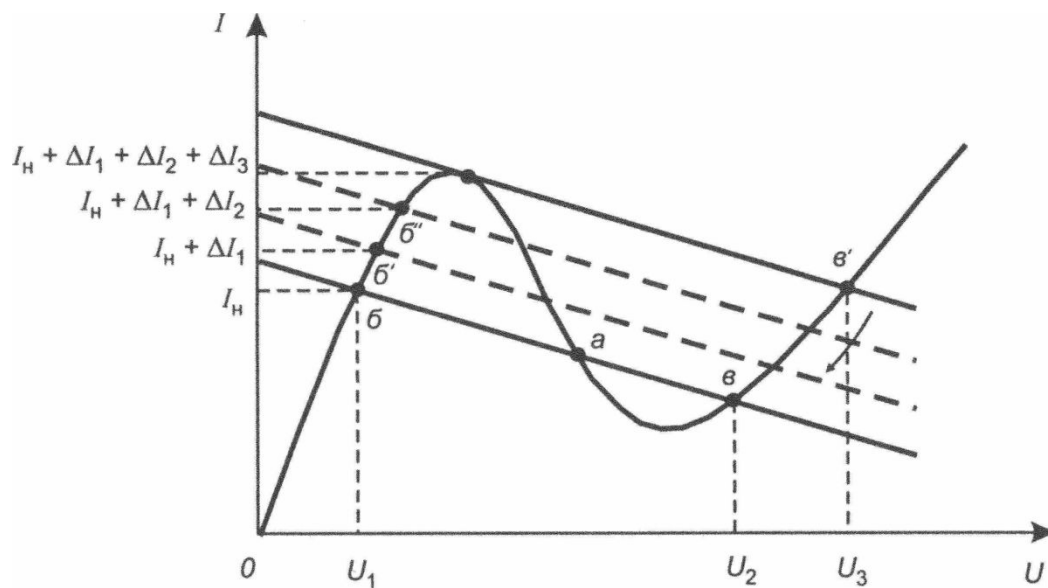
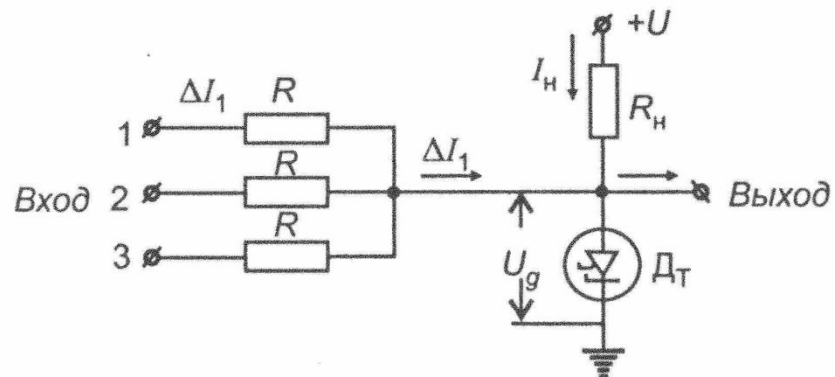
Устройства на туннельных диодах

Логические устройства на туннельных диодах. Логическое «И»

Эта же схема может работать как схема «И». Для этого необходимо понизить величину тока I_H источника питания и на вход 1-2-3 подавать импульсы, каждый из которых независимо не в состоянии переключить туннельный диод в закрытое состояние, т. е. в положение « ϵ_1 ».

Если на один из входов подать сигнал, то схема не переключится в состояние с большим сопротивлением, а рабочая точка перейдет в положение « ϵ' ». При подаче сигналов на два входа одновременно рабочая точка останется в области низкого напряжения « ϵ'' ».

Если же на все три входа импульсы придут одновременно, схема переключится в состояние высокого сопротивления.



Функциональная полупроводниковая электроника

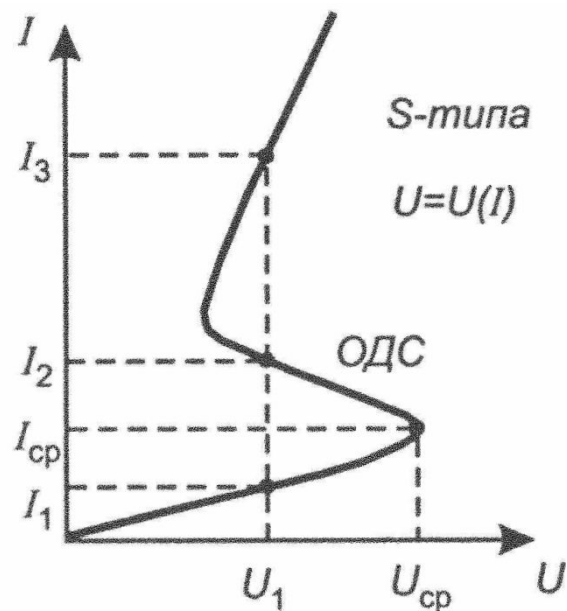
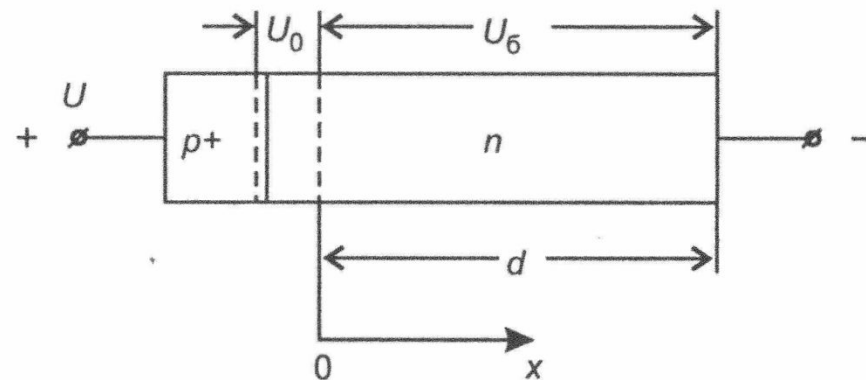
Диоды с S-образной ВАХ

В несимметричных $p^+ - n$ -переходах с широкой базой из высокоомного полупроводника вид вольт-амперной характеристики будет определяться падением напряжения на $p^+ - n$ -переходе и на омическом сопротивлении базы.

При определенных условиях с ростом инжекции, с ростом тока, подвижность в базе инжектированных дырок и, следовательно, проводимость будет увеличиваться, т.е. возникает процесс, который приводит к ОДС.

Если в результате случайной флуктуации ток в какой-нибудь части сечения диода возрастет, то через эту область диода начнется усиленная инжекция дырок в базу. В результате плотность тока по сечению будет неодинакова – образуются каналы с большой плотностью тока – **шнуры тока**.

S-образную ВАХ, кроме S-диодов имеют ряд устройств с более сложной структурой: полевой транзистор с $p - n$ -переходом в качестве затвора, который занимает небольшую площадь на боковой поверхности и включен в прямом направлении; лавинный биполярный транзистор и др.



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диодов с S-образной ВАХ

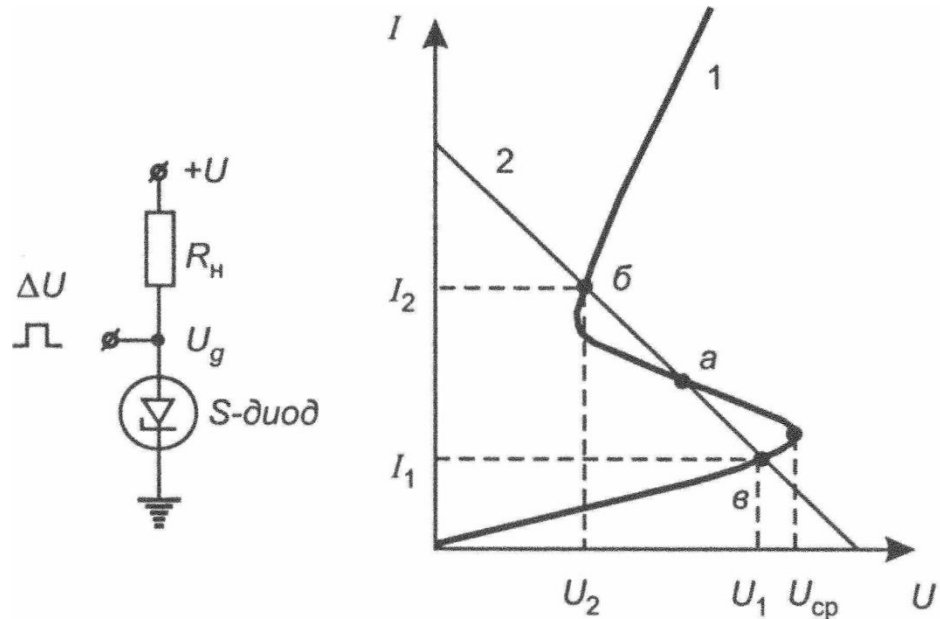
Переключатель

Если дифференциальное сопротивление диода на участке ОДС $|R_g| > R_H$, то при достаточно большой величине U могут быть три точки пересечения ВАХ диода 1 и нагрузочной прямой 2, точки равновесия *а*, *б*, *в*.

При подаче соответствующего напряжения на диоде устанавливается равновесная рабочая точка. Например, в положении «*в*» и протекает небольшой ток I_1 . S-диод находится в закрытом состоянии.

Если подать на диод положительный импульс напряжения $\Delta U > U_{cp} - U_1$, то напряжение на диоде превысит напряжение срыва U_{cp} и S-диод включится: ток резко возрастет до I_2 и равновесная точка скачком перейдет в положение «*б*».

Переход в первоначальное состояние осуществляется подачей отрицательно импульса на диод.



Функциональная полупроводниковая электроника

Устройства на основе диодов с S-образной ВАХ

Релаксационный генератор

Генератор создается параллельным подключением конденсатора к S-диоду.

В этом случае дифференциальное сопротивление S-диода на участке отрицательного сопротивления $|R_g| < R_H$, и нагрузочная прямая 2 может пересекать вольт-амперную характеристику диода 1 только в одной точке. Параметры цепи и напряжение подбирают, чтобы это было на участке ОДС.

При включении напряжения конденсатор заряжается. При достижении на его пластинах напряжения U_{cp} ток через диод резко возрастает. Напряжение на конденсаторе не может мгновенно измениться и рабочая точка переходит из положения «в» в положение «г». Происходит разряд конденсатора через S-диод. Рабочая точка смещается в положение «б», диод выключается, рабочая точка скачком переходит в положение «г» и конденсатор снова заряжается до напряжения срыва U_{cp} .

