

Устройства функциональной электроники

Функциональная диэлектрическая электроника

Кроме сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических эффектов, которые мы рассмотрели на прошлом занятии, в функциональной диэлектрической электронике используется еще ряд свойств диэлектриков.

Эти свойства проявляются только в **тонких диэлектрических пленках** и не наблюдаются в массивных диэлектриках.

Например, при контакте тонких диэлектрических пленок с металлом в диэлектрик переходят свободные носители заряда и накапливаются вблизи у контакта в тонком слое диэлектрика.

Когда диэлектрик массивный, то весь его остальной объем обладает большим сопротивлением, и в системе «металл-диэлектрик-металл» электрический ток очень мал.

Если же в такой системе массивный диэлектрик заменен тонкой диэлектрической пленкой (толщиной порядка 1 – 10 мкм), то эмитируемые из металла электроны заполняют весь объем диэлектрической пленки и приложенное напряжение создает электрический ток проводимости через диэлектрик. В этом случае возникают эмиссионные токи, аналогичные эмиссионным токам в вакууме, которыми можно управлять.

Закономерности явлений, связанных с **протеканием эмиссионных токов в тонких диэлектрических пленках**, и функциональные элементы и устройства на их основе являются еще одной областью **функциональной диэлектрической электроники**.

Функциональная диэлектрическая электроника

Основными механизмами переноса носителей заряда в пленочных системах являются:

- **туннельное прохождение электронов через тонкую диэлектрическую пленку;**
- **токи через тонкие диэлектрические пленки, обусловленные надбарьерной эмиссией электронов.**

При этом протекание тока через диэлектрическую пленку сопровождается образованием заряда в диэлектрике, таким образом токи являются **ограниченными пространственным зарядом.**

На основе управления токами в тонких диэлектрических пленках могут быть созданы **устройства функциональной диэлектрической электроники:**

- диэлектрические диоды;
- диэлектрические диоды с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
- диоды с резонансным туннелированием;
- тонкопленочные триоды с туннельной эмиссией электронов и др.

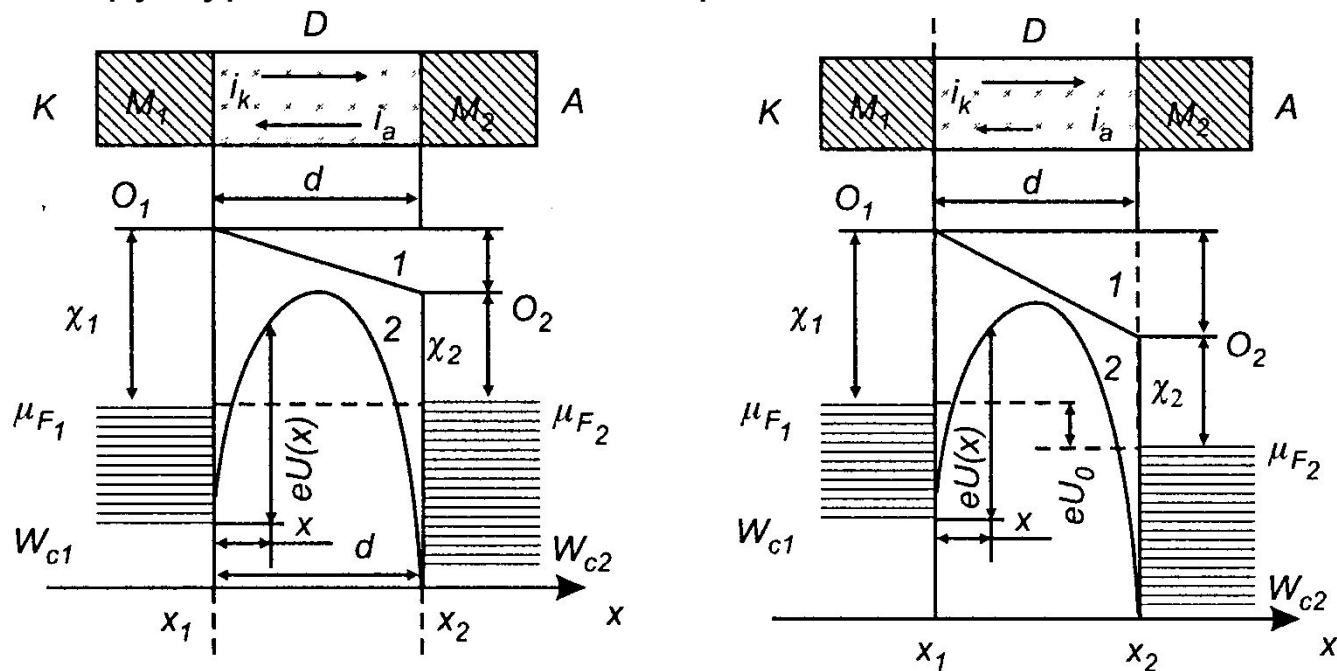
Функциональные устройства диэлектрической электроники пока не получили широкого применения, хотя потенциально весьма перспективны.

Они малоинерционны, обладают низким уровнем шумов, хорошими частотными характеристиками, малочувствительны к радиации и температурным изменениям. Кроме того, создание эмиссионных токов в диэлектриках не требует затраты энергии на нагрев эмиттирующего электрода.

Функциональная диэлектрическая электроника

Туннельное прохождение электронов через тонкую диэлектрическую пленку

Пленочная структура «металл – диэлектрик – металл»



χ_1, χ_2 – термодинамические работы выхода электронов из металлов; O_1, O_2 – уровни вакуума.

При отсутствии внешней разности потенциалов (равновесном состоянии) энергия Ферми для металлов находится на одном уровне, туннельные токи равны $i_K = i_A$ и результирующий ток равен нулю.

Если приложить разность потенциалов U_0 , то уровни Ферми сместятся относительно друг друга $\mu_{F1} - \mu_{F2} = eU_0$ и туннельные токи i_K и i_A не будут равны.

Функциональная диэлектрическая электроника

Туннельное прохождение электронов через тонкую диэлектрическую пленку

С учетом коэффициента прозрачности барьера

$$D(W_{ex}) = D_0 \exp \left[- \frac{2}{h} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m^* [W(x) - W_{ex}]} dx \right],$$

где $W(x) = eU(x)$ – высота потенциального барьера на расстоянии x от поверхности металла M_1 , отсчитанная от дна зоны проводимости, принятого условно за нулевой уровень; W_{ex} – кинетическая энергия электрона, соответствующая составляющей скорости электрона вдоль оси x (перпендикулярной поверхности металлов); D_0 – коэффициент, близкий по величине к единице

можно найти туннельный ток, представляющий собой разность токов в двух противоположных направлениях, для барьера в параболическом приближении при низких температурах

$$i \sim [1 - \exp(-\beta_1 U_0)] \exp(\beta_2 U_0 - \beta_3 U_0^2),$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – постоянные не зависящий от U_0 и определяемые параметрами системы χ_1, χ_2

При малых напряжениях, когда экспоненты можно разложить в ряд и ограничиться первыми членами разложения,

$$i \sim U_0,$$

т. е. в области малых напряжений зависимость туннельного тока от напряжения линейна, что хорошо согласуется с экспериментом.

Что касается температурной зависимости туннельного тока, то теория приводит к квадратичной зависимости

$$i \sim T^2.$$

Функциональная диэлектрическая электроника

Туннельное прохождение электронов через тонкую диэлектрическую пленку

Экспериментальные исследования тока через тонкопленочную систему «металл – диэлектрик – металл» показывают, что при малых толщинах диэлектрика ($d < 50 \text{ \AA}$) и сравнительно низких температурах **ток в системе обусловлен в основном туннельным эффектом.**

Практически на всех системах наблюдалось вначале линейное возрастание тока с увеличением напряжения, которое затем переходило в экспоненциальное с последующим замедлением роста тока.

Последнее связано главным образом с наличием ловушек в диэлектрической пленке. Туннельный ток для очень тонких пленок отличается стабильностью, плотность его может достигать больших величин – порядка 10^6 А/м^2 .

Функциональная диэлектрическая электроника

Токи через тонкие диэлектрические пленки, обусловленные надбарьерной эмиссией электронов

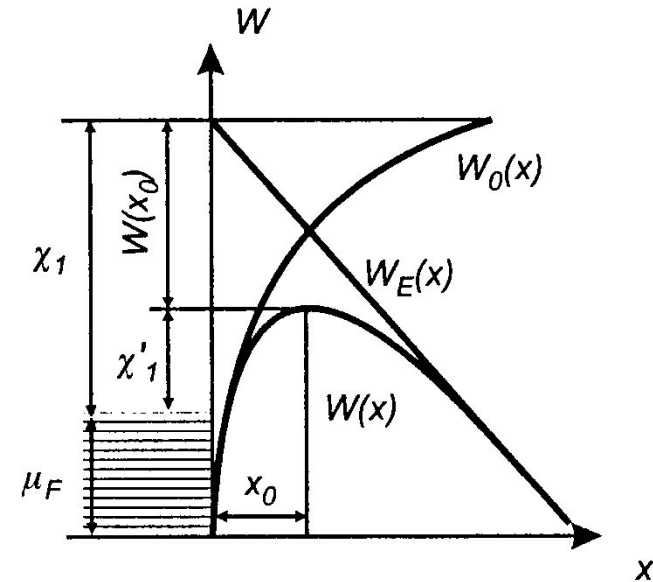
При температуре $T > 0 \text{ K}$ свободные электроны твердого тела, имеющие энергию большую, чем работа выхода могут покинуть твердое тело и образовать ток термоэлектронной эмиссии.

Снижение высоты потенциального барьера χ под действием приложенного электрического поля называется **эффектом Шоттки**. Электронная эмиссия, возникающая над сниженным под воздействием поля потенциальным барьером, называется эмиссией Шоттки, или надбарьерной эмиссией.

Если к металлу, находящемуся в вакууме, приложить электрическое поле E , нормальное к поверхности, то на электрон, находящийся у поверхности, будет действовать сила $F = -eE$, стремящаяся вырвать электрон из металла.

На длине x эта сила произведет работу eEx , и следовательно, потенциальная энергия электрона уменьшится на $W_e = -eEx$. Суммарная энергия электрона равна алгебраической сумме $W_0(x) + W_E(x) = W(x)$.

Днешнее поле, с одной стороны, понижает высоту потенциального барьера на $W(x_0)$ тем самым уменьшает работу выхода до $\chi' = \chi - W(x_0)$ и, с другой стороны, уменьшает толщину потенциального барьера, увеличивая тем самым вероятность туннелирования электронов сквозь него.



Функциональная диэлектрическая электроника

Токи через тонкие диэлектрические пленки, обусловленные надбарьерной эмиссией электронов

Снижение высоты потенциального барьера

$$W(x_0) = -\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0\epsilon}}$$

Работа выхода электронов из металла при наличии внешнего электрического поля будет

$$\chi' = \chi - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0\epsilon}}$$

Подставляя работу выхода в уравнение Ричардсона-Дэшмена, определяющего термоэлектронную эмиссию

$$i_T = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi}{k_0T}\right),$$

получим

$$i_{ш} = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi}{k_0T}\right) \exp\left(\frac{1}{k_0T} \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0\epsilon}}\right).$$

Эта формула называется **формулой Шоттки**, который впервые получил ее.

Эмиссия электронов под действием электрического поля называется **холодной эмиссией**, или эмиссией Шоттки. В отличие от туннельного тока, когда электроны просачиваются сквозь барьер, шоттковский ток возникает в результате прохождения электронов над барьером.

Функциональная диэлектрическая электроника

Токи через тонкие диэлектрические пленки, обусловленные надбарьерной эмиссией электронов

В тонкопленочной системе «металл – диэлектрик – металл» полный ток равен разности токов, идущих от катода к аноду $-i_K$ и от анода к катоду i_A

$$i_{\text{ш}} = i_k - i_a = AT^2 \left[\exp\left(-\frac{\chi'}{k_0T}\right) - \exp\left(-\frac{\chi''}{k_0T}\right) \right] =$$

$$= AT^2 \exp\left(-\frac{\chi'}{k_0T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eU_0}{k_0T}\right) \right].$$

Подставляя выражение для χ' получим

$$i_{\text{ш}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi}{k_0T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eU_0}{k_0T}\right) \right] \times$$

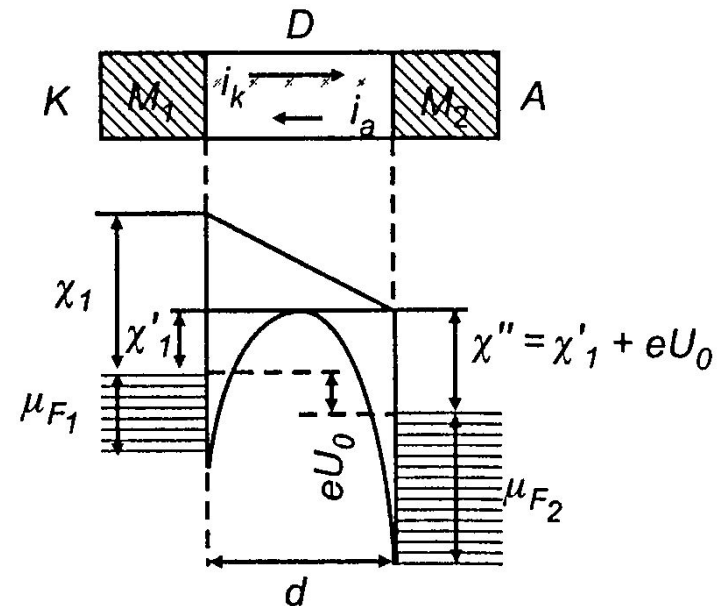
$$\times \exp\left(\frac{1}{k_0T} \sqrt{\left(\frac{e^3 \ln 2}{4\pi\epsilon_0\epsilon d}\right)^2 + \frac{e^3 E}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}\right).$$

Из последнего выражения, считая, что $E = U_0/d$, следует, что

$$\ln i_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{U_0}}{k_0T}.$$

При малых напряжениях $i_{\text{ш}} \sim U_0$, т.е. в области малых напряжений зависимость тока надбарьерной эмиссии от напряжения линейна.

Полевая эмиссия Шоттки наряду с туннельной эмиссией является одним из основных механизмов переноса зарядов в системе «металл – диэлектрик – металл».



Функциональная диэлектрическая электроника

Токи, ограниченные пространственным зарядом

Идеальный диэлектрик в тонкопленочной системе «металл – диэлектрик – металл» подобен **вакуумному промежутку**, поскольку в нем отсутствуют (или находятся в очень малом количестве) свободные носители заряда из-за большой ширины запрещенной зоны.

Проводимостью диэлектрической пленки, так же как и вакуумного промежутка, можно управлять с помощью инъекции в него свободных носителей заряда.

Однако в отличие от вакуума вследствие

- *теплого движения атомов кристалла,*
- *наличия нейтральных и заряженных примесей,*
- *различных структурных дефектов*

носители заряда будут испытывать непрерывное рассеяние, что приводит к другому, по сравнению с вакуумом, закону движения носителей заряда.

При этом носители заряда могут захватываться определенными локальными центрами – **ловушками** (атомами примеси, дефектами и т.п.), энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне диэлектрика. Концентрация ловушек существенно зависит от технологии получения диэлектрического слоя и может изменяться в широких пределах $10^{20} - 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

Захваченные носители заряда создают неподвижный пространственный заряд и не переносят заряд через диэлектрик. Проводимость диэлектрика определяется лишь свободными инжектированными носителями заряда, не захваченными ловушками.

Функциональная диэлектрическая электроника

Токи, ограниченные пространственным зарядом

Свободные носители так же, как и носители, захваченные ловушками, образуют **нескомпенсированный пространственный заряд**.

Пространственный, объемный заряд носителей, захваченный ловушками, и свободных носителей, инжектированных в диэлектрический слой, определяет закономерность прохождения тока через этот слой.

Такие токи через диэлектрик называют токами, ограниченными пространственным зарядом. Плотность пространственного заряда $\rho = e(n + n_L)$.

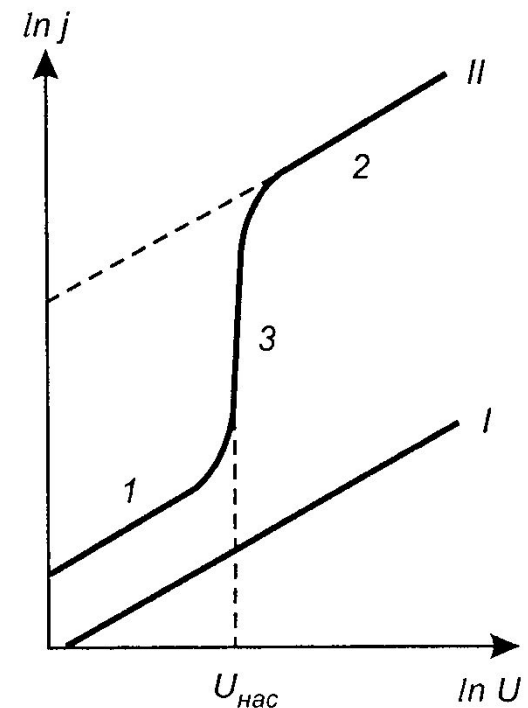
Плотность тока инжектированных носителей заряда в диэлектрике, не содержащем ловушек

$$j \sim \frac{U^2}{d^3}.$$

Эта зависимость выражает закон Чайльда – прямая I.

В диэлектрике, содержащем ловушки, вольт-амперная характеристика изменяется (кривая II). Напряжению $U_{нас}$ соответствует состояние диэлектрика при полностью заполненных инжектированными носителями заряда ловушках.

При более низких напряжениях, когда $U < U_{нас}$ (участок 1 на кривой II) происходит сильный захват носителей ловушками. В этом случае ток ограничивается пространственным зарядом на ловушках и с точностью до постоянного множителя соответствует закону Чайльда.



Функциональная диэлектрическая электроника

Токи, ограниченные пространственным зарядом

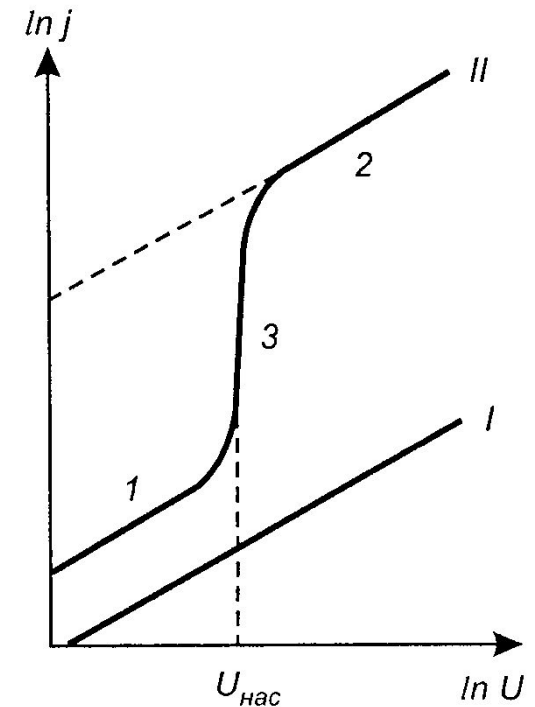
При высоких напряжениях, когда $U > U_{\text{нас}}$ (участок 2 на кривой II) ловушки полностью заполнены и все инжектированные носители участвуют в формировании тока. Пространственный заряд носителей на ловушках можно считать пренебрежительно малым по сравнению с пространственным зарядом инжектированных носителей. ВАХ в этой области также с точностью до постоянного множителя совпадает с законом Чайльда.

В переходной области 3 на кривой II наблюдается резкая зависимость тока от напряжения

$$j \sim U^n$$

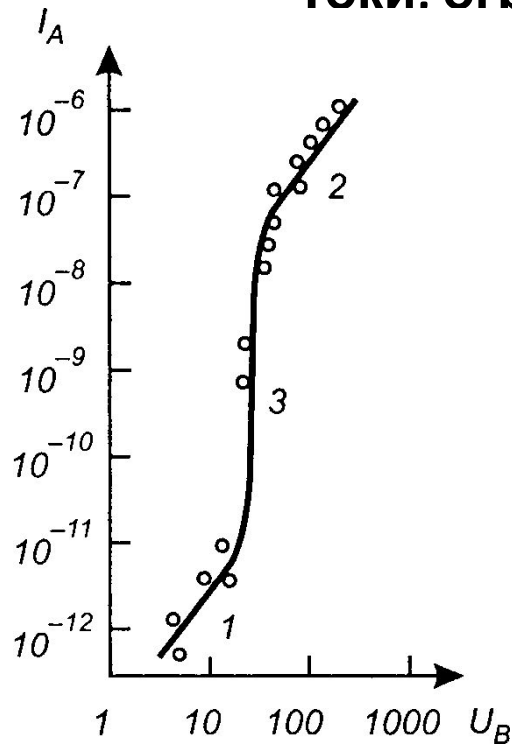
где $n = 3 - 10$ и зависит от глубины залегания и концентрации ловушек.

Резкое изменение тока в переходной области 3 обусловлено тем, что заполнение ловушек происходит в соответствии с распределением Ферми – Дирака, имеющим резко выраженный ступенчатый характер.



Функциональная диэлектрическая электроника

Токи, ограниченные пространственным зарядом



ВАХ системы
In – ZnS – Te

В ряде тонкопленочных систем, в частности $W - SiC - W$, $C(\text{графит}) - CdS - Ag$ и др. при прохождении тока через диэлектрический слой (или слой широкозонного полупроводника) наблюдается **прианодная электролюминесценция**, вызванная рекомбинацией электронов с **дырками, инжектированными анодом**.

Такая инжекция называется **двойной инжекцией**. Величина тока в этих случаях существенно превышает теоретическое значение для инжекции носителей одного знака. Это обусловлено уменьшением пространственного заряда из-за наличия носителей обоих знаков.

При двойной инжекции основную роль играет взаимная нейтрализация пространственного заряда носителей разных знаков и рекомбинация электронов и дырок – прямая или через рекомбинационные центры.

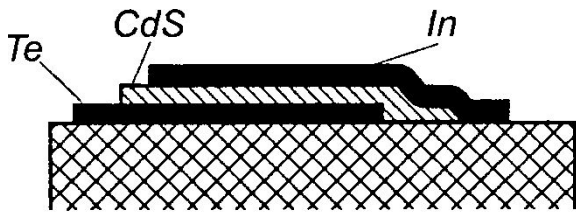
Если преобладает первый процесс, то ВАХ мало отличается от вольт-амперной характеристики при инжекции одного типа носителей заряда.

Если же преобладает второй процесс – рекомбинация, то на вольт-амперной характеристике появляется область **отрицательного дифференциального сопротивления или проводимости**, в которой и наблюдается электролюминесценция.

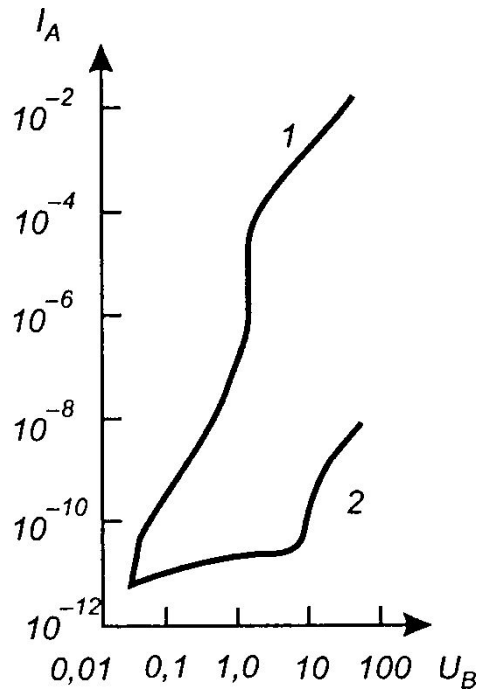
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на тонкопленочных диэлектрических структурах.

Диэлектрические диоды



Толщина слоя CdS 10 мкм, рабочая площадь 1 мм²

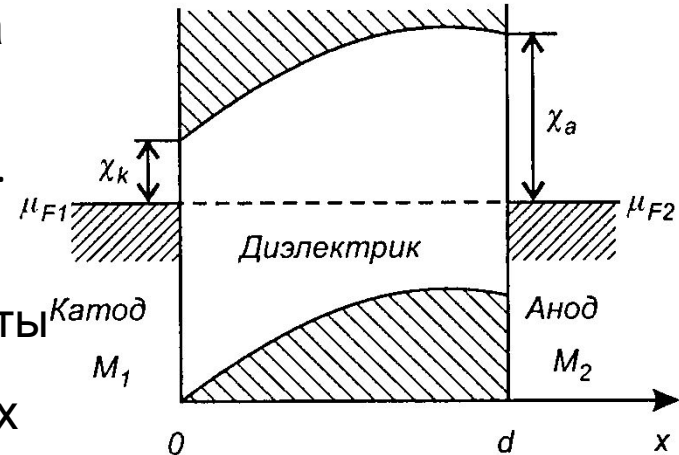


ВАХ системы
 $In - CdS - Te$

1 – прямое включение,
2 – обратное включение

Тонкопленочная структура «металл – диэлектрик (широкозонный полупроводник) – металл».

Выпрямляющее действие диэлектрического диода связано с различием работы выхода электронов из электродов, изготовленных из разных металлов.



Для одного из электродов – катода – используется металл, у которого работа выхода элементов в данный диэлектрик χ_k (χ_{In}) мала (доли электрон-вольт), для другого электрода – анода – применяется металл с большой работой выхода χ_a (χ_{Te}) (1 – 2 эВ). В результате в прямом направлении токи достигают больших величин, а в обратном – малы.

Коэффициент выпрямления диэлектрического диода достигает значений 10^6 и более. В отличие от диодов на $p - n$ -переходах диэлектрические диоды, вследствие широкой запрещенной зоны диэлектриков, пригодны для работы при высоких температурах. Недостатками выпрямительных диэлектрических диодов являются значительное прямое смещение, малая мощность и т.п.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на тонкопленочных диэлектрических структурах.

Диэлектрические диоды с отрицательным дифференциальным сопротивлением

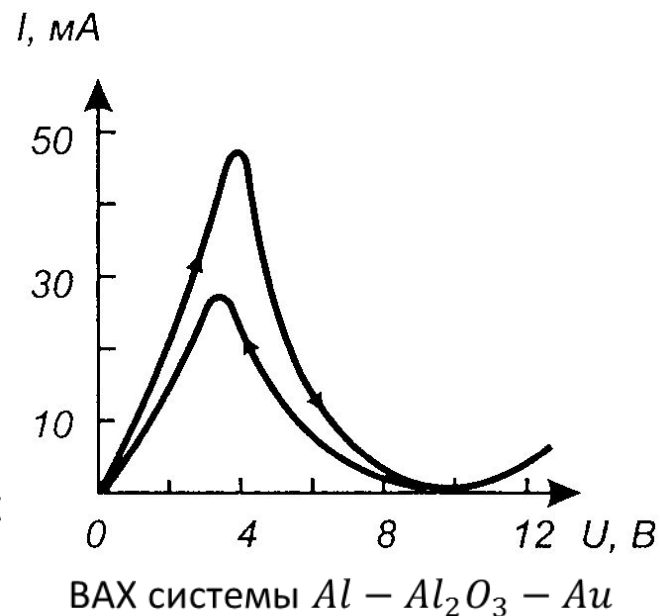
Многие диодные структуры с тонкой диэлектрической пленкой показывают вольт-амперные характеристики с **отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа**. Механизм возникновения отрицательного дифференциального сопротивления связан с лавинным размножением при ударной ионизации – так называемым обратимым пробоем.

Вольт-амперные характеристики S-образного типа наблюдались в системах $Ti - TiO_2 - Ag$, $Nb - Nb_2O_3 - Au$ и др. В некоторых пленках, обладающих характеристиками S-типа, обнаружены также явления памяти и переключения с двумя устойчивыми состояниями.

Известны и системы с тонкими диэлектрическими пленками, в которых получены вольт-амперные характеристики **N-типа**. Диэлектрическими слоями являлись окислы, которые получались в основном с помощью электролитического окисления ряда металлов. Эффект получен для Al, Ta, Cu, Fe, Mo, W и других металлов.

Пленки окислов металлов толщиной свыше 100 \AA , полученные термическим окислением или анодированием, обычно бывают при малых напряжениях электрического поля хорошими изоляторами с большим удельным сопротивлением ($10^{12} - 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

При повышении напряжения между двумя электродами при некотором напряжении ток сквозь систему возрастает на несколько порядков.



Функциональная диэлектрическая электроника

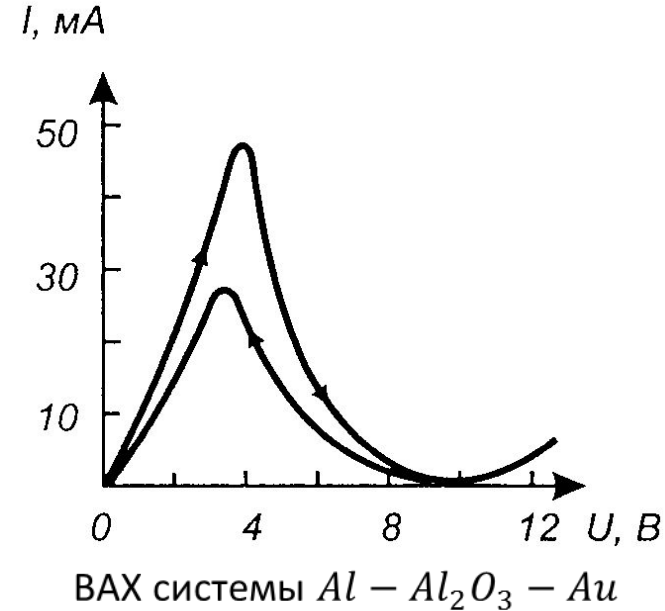
Устройства на тонкопленочных диэлектрических структурах.

Диэлектрические диоды с отрицательным дифференциальным сопротивлением

При дальнейшем повышении напряжения на вольт-амперной характеристике появляется участок отрицательного сопротивления N -типа, сохраняющийся как при повышении, так и при понижении напряжения.

После ряда циклов повышения и снижения напряжения нестабильная вначале вольт-амперная характеристика становится гораздо стабильнее.

Вольт-амперные характеристики N -типа наблюдаются, как правило, на сильно дефектных диэлектрических пленках, содержащих большую концентрацию локальных электронных состояний, распределенных по всей ширине запрещенной зоны.



Предпочтительной гипотезой для объяснения отрицательного дифференцированного сопротивления N -типа является гипотеза о **примесной или прыжковой проводимости**.

- При малых напряжениях число незанятых вакансий на примесных центрах и других дефектах велико, следовательно, велика также и прыжковая проводимость.
- При инжекции носителей заряда вакансии заполняются и прыжковая проводимость уменьшается.
- С дальнейшим увеличением напряжения возможно увеличение тока за счет вклада проводимости по зоне.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на тонкопленочных диэлектрических структурах.

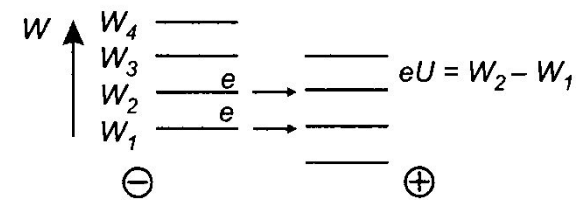
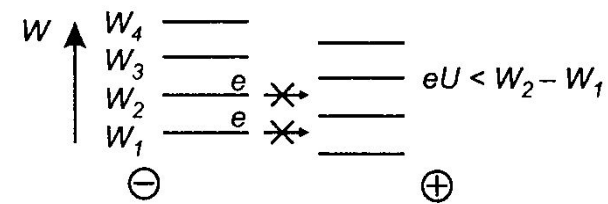
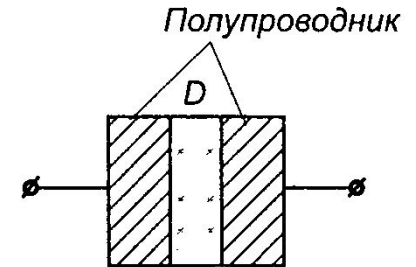
Диэлектрические диоды с резонансным туннелированием

Перспективные функциональные устройства разработаны на основе **тонкопленочных структур «полупроводник – диэлектрик – полупроводник»**, в которых из-за малой толщины полупроводниковых пленок энергетический спектр электронов квантован (размерное квантование) – преобразователь постоянного напряжения в переменный ток, перестраиваемый фотоприемник и др.

При малой концентрации свободных электронов в полупроводниковых пленках заняты лишь нижние уровни зоны проводимости, и при отсутствии внешнего напряжения дискретные уровни в зонах проводимости полупроводниковых пленок совпадают.

Если приложенное напряжение U таково, что энергия электронов eU меньше разности энергий второго и первого уровней $eU < W_2 - W_1$, то ток через систему не протекает, ибо при таком расположении энергетических уровней туннелирование через диэлектрическую пленку невозможно. Туннельный ток возникает тогда, когда приложенное напряжение удовлетворяет условию $eU = W_2 - W_1$. В результате при монотонном изменении напряжения ток в пленочной системе будет скачкообразным.

Недостающую энергию для реализации туннелирования электрон может получить от квантов света при оптическом поглощении, т.о. такая структура может выполнять функции перестраиваемого по спектру фотоприемного устройства.¹⁷

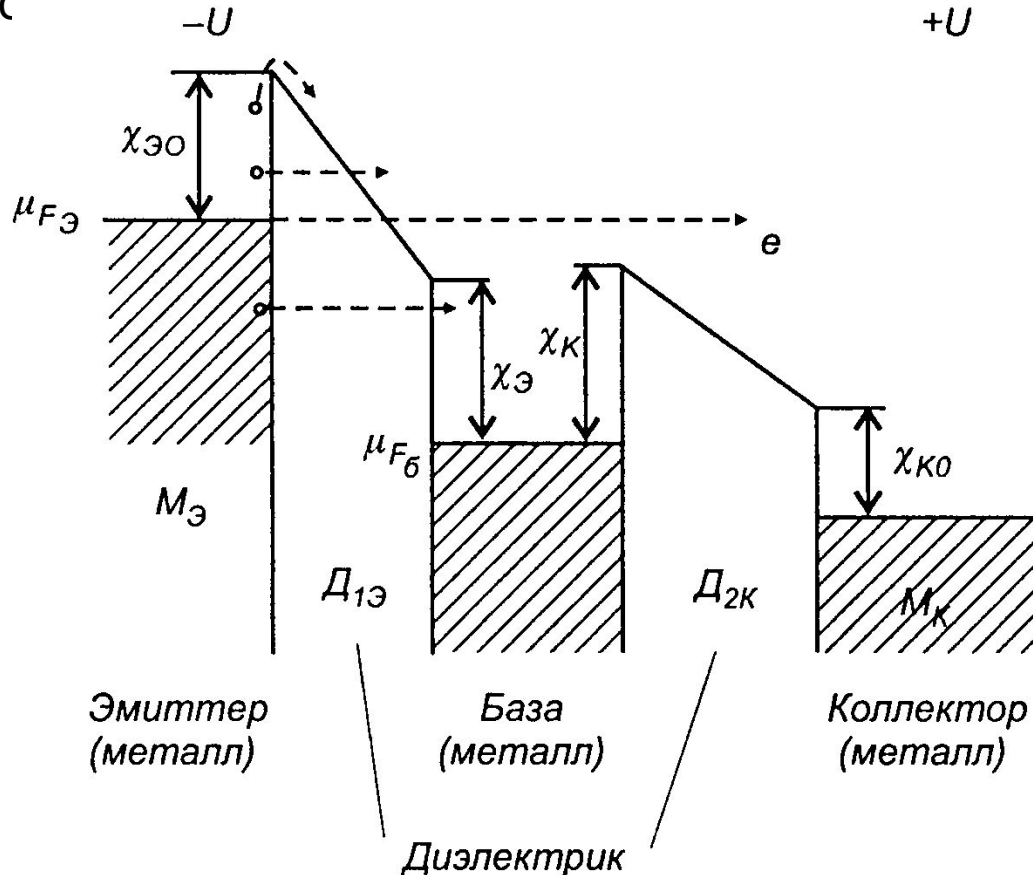


Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических

В 1960 г. был предложен тонкопленочный **структурный** диод с туннельной эмиссией электронов.

В такой структуре электроны с уровня Ферми металлической пленки эмиттера туннелируют в зону проводимости диэлектрика, отделяющего эмиттер от слоя металлической базы. Электроны, которые не рассеиваются, могут достичь металлической пленки коллектора, если уровень Ферми эмиттера находится выше максимума пс

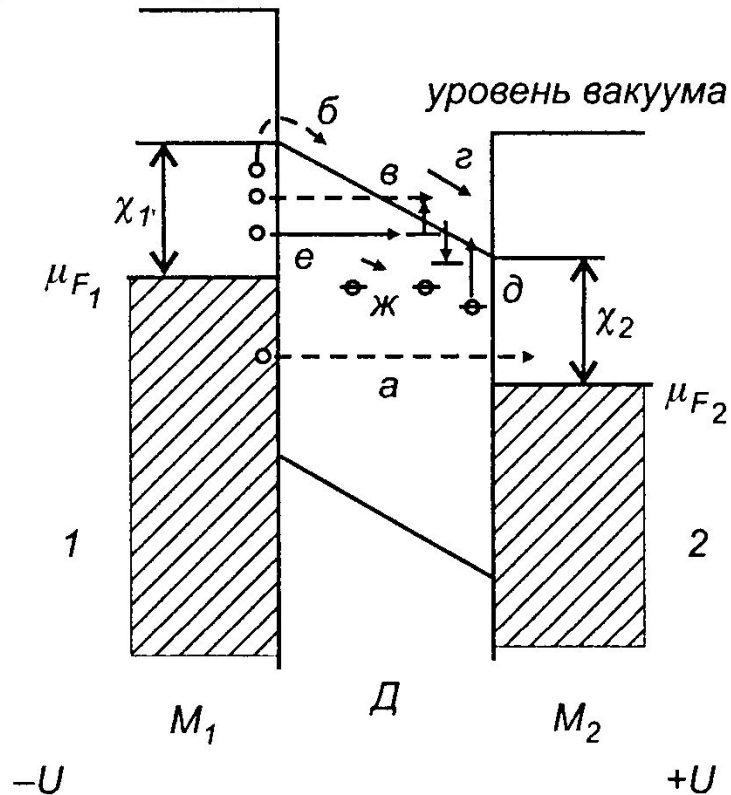


Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

Механизмы прохождения электронов **в структурах** уровень вакуума
диэлектрик:

1. Простейший механизм – **непосредственное туннелирование электронов** из валентной зоны одного электрода в зону проводимости другого электрода (а).
2. Носители могут инжектировать в зону проводимости (или валентную зону) диэлектрика посредством **термоэлектронной эмиссии, или эмиссии Шоттки, через потенциальный барьер** на границе раздела диэлектрик-металл (б).
3. Носители могут **туннелировать сквозь потенциальный барьер в диэлектрике под действием сильного электрического поля** изменяющего ширину барьера (в) (автоэлектронная эмиссия или эмиссия горячих электронов).
4. Перенос электронов в зону проводимости диэлектрика видоизменяется в зависимости от **процессов рассеяния (г) и захвата носителей на ловушки (д)**, концентрация которых в аморфных пленках может быть достаточно высокой.
5. При наличии ловушек возможно **туннелирование носителей заряда через ловушки (е) и прыжковая проводимость по ловушкам (ж)**.



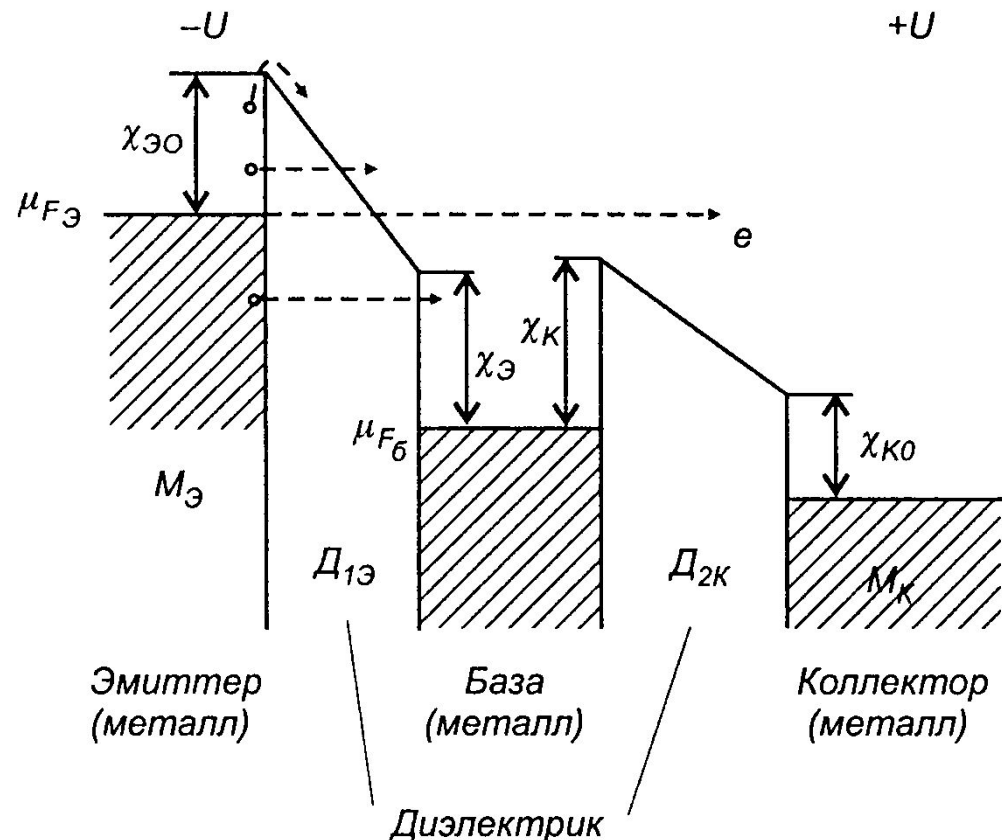
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

Основой тонкопленочного триода, транзистора, является тонкая металлическая пленка, которая служит аналогом базы в полупроводниковом биполярном транзисторе. Толщина пленки порядка длины пробега горячих электронов в ней, т. е. электронов, энергия которых значительно больше средней энергии равновесных носителей заряда. Таким образом практически все инжектированные в кристалл горячие электроны пройдут сквозь пленку.

Толщина металлической пленки базы порядка 100 \AA . К этой пленке с обеих сторон примыкают тонкие диэлектрические (или полупроводниковые) пленки $D_{1Э}$ и $D_{2К}$.

Высота контактных барьеров должна быть не очень высокой, чтобы поток неравновесных горячих электронов, входящих в металлическую пленку, был заметно выше потока равновесных термических электронов, эмитируемых из пленки $M_Э$.



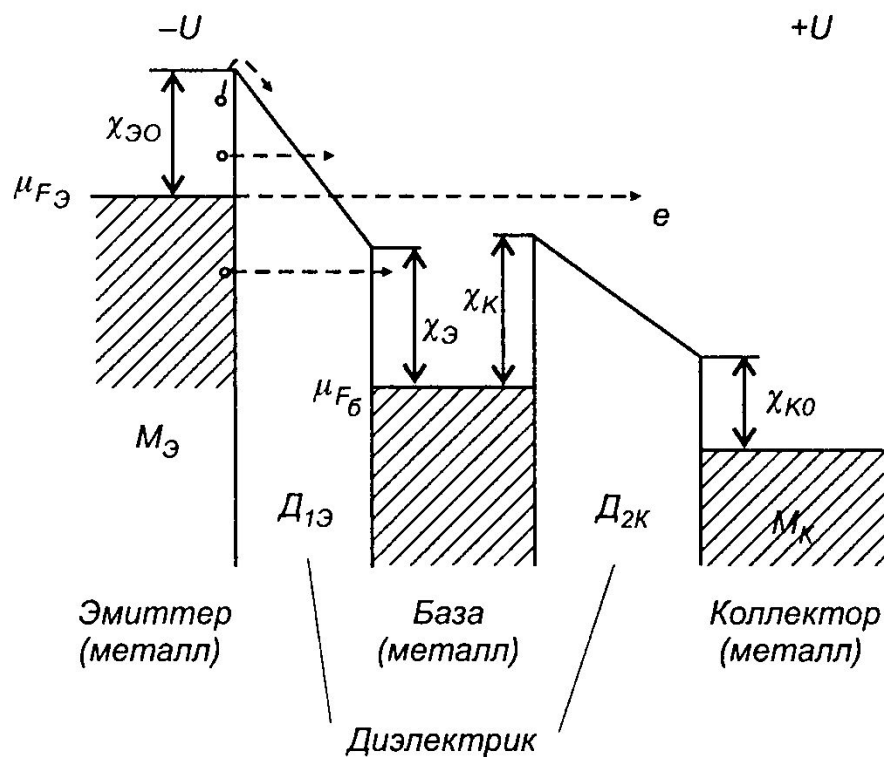
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

Пусть на металлическую базовую пленку слева падает поток электронов $I_{\text{Э}}$, проходящих под контактным барьером $\chi_{\text{Э}}$. Часть электронов, рассеиваясь в пленке и отражаясь от ее правой границы, составляет «ток базы» $I_{\text{Б}}$. Другая часть $I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{Б}} = \alpha I_{\text{Э}}$ проходит под контактным барьером $\chi_{\text{К}}$ вправо.

Пленка диэлектрическая или полупроводниковая, граничащая справа с металлической базовой пленкой, называется коллекторной $D_{2\text{К}}$.

Если ток $\alpha I_{\text{Э}}$ существенно превышает ток $I_{\text{Э}0}$ через эту пленку в случае, когда нет потока горячих электронов из эмиттера, и ток определяется только эмиссией горячих электронов из базовой пленки в коллектор, а кроме того, на коллекторную пленку $D_{2\text{К}}$ можно приложить достаточно высокое напряжение, то система может в принципе работать в качестве усилителя напряжения или мощности.



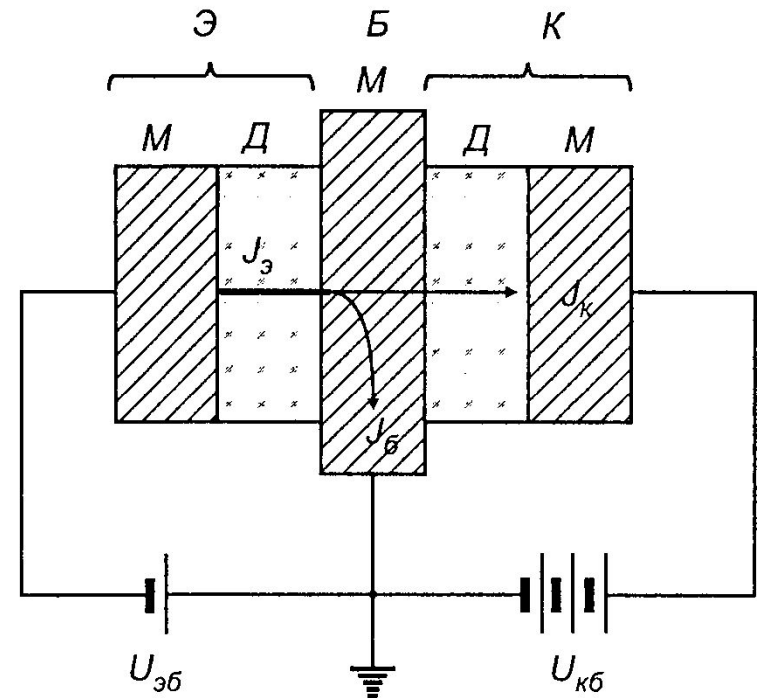
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

В качестве эмиттерного слоя можно использовать очень тонкую пленку диэлектрика $D_{1Э}$ ($20 - 100 \text{ \AA}$), покрытую металлическим электродом $M_Э$. Механизм токопрохождения – туннельная эмиссия электронов из металла $M_Э$ (или непосредственно в металл Б, или в зону проводимости диэлектрика $D_{1Э}$).

Такие пятислойные системы составляют класс пленочных функциональных устройств с горячими электронами в металлической базе и туннельной инжекцией горячих электронов.

Для усиления по напряжению и по мощности необходимо выполнение условия $U_{КБ} > U_{ЭБ}$, где $U_{КБ}$ – напряжение между базой и коллектором, а $U_{ЭБ}$ – напряжение между эмиттером и базой.



Модель пленочного диэлектрического транзистора на горячих электронах

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

В качестве эмиттерного слоя можно так же использовать очень тонкую пленку полупроводника $P_{\text{Э}}$, а эмиттерный электрод $M_{\text{Э}}$ образует с пленкой $P_{\text{Э}}$ почти омический контакт.

Активная часть такой системы «полупроводник – металл – полупроводник» (ПМП) состоит из двух шоттковских барьеров.

Эмиттерный барьер $P_{1\text{Э}} - B$ включается в прямом направлении, вследствие чего в металлическую пленку B будет идти поток горячих электронов. Ток в полупроводниковой эмиттерной пленке $P_{1\text{Э}}$ носит диффузионный характер.

Принципы работы пленочного и биополярного транзисторов аналогичны.

Отличие состоит в том, что в пленочных диэлектрических транзисторах в металлическую базу инжектируются основные носители заряда – горячие электроны.

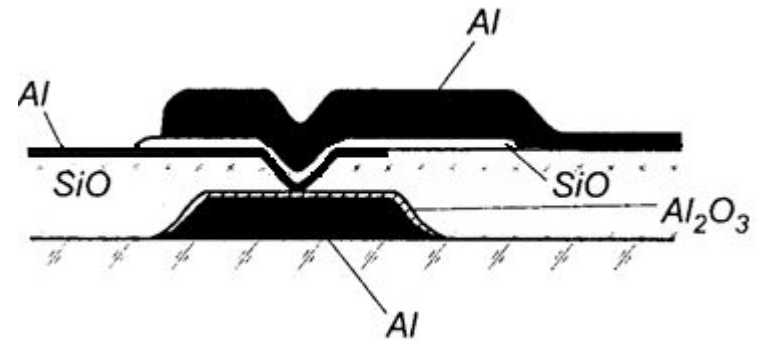
Возбуждение горячих электронов и инжекция их в базу основываются на процессах туннелирования электронов сквозь тонкий диэлектрик эмиттера. В диэлектрических транзисторах для уменьшения поглощения инжектированных электронов базу делают очень тонкой (0,01– 0,02 мкм), и при столь малой толщине базы диэлектрический транзистор обладает потенциально лучшими СВЧ-характеристиками по сравнению с биполярным транзистором.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

Диэлектрический транзистор с туннельной инжекцией на основе Al_2O_3

1. На стеклянную подложку испарялась полоска Al площадью 5 мм^2 , толщиной – 1000 \AA .
2. Затем проводилось электролитическое окисление в аммиачном растворе до получения толщины Al_2O_3 $50 - 100 \text{ \AA}$.
3. Для предотвращения краевых эффектов и фиксации рабочей площади на окисел Al_2O_3 наносится толстый слой ($\sim 1000 \text{ \AA}$) буферного диэлектрика SiO . Ширина рабочей области Al_2O_3 оставалась равной 1 мм .
4. На слой диэлектрика наносилась пленка базы Al толщиной $\sim 300 \text{ \AA}$.
5. Затем методом испарения на пленку базы наносится второй диэлектрик SiO , являющийся коллекторным слоем толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$.
6. Для формирования коллектора наносят толстый металлический слой Al .



Контакты к электродам осуществлялись с помощью припоя из чистого индия.

На системе $Al - Al_2O_3 - Al - SiO - Al$ получены значения $\alpha > 0,3$.

Существенное преимущество транзистор ПМП имеет перед биполярным $n - p - n$ -транзистором при эксплуатации транзистора в условиях повышенной радиации.

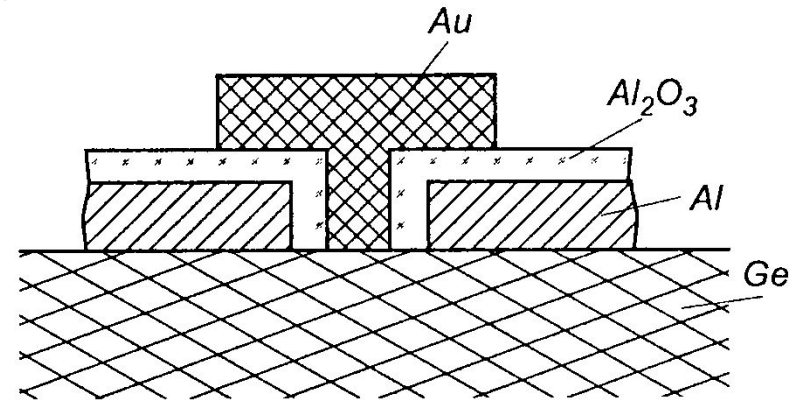
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических

Устройство на основе управляемой туннельной эмиссии

На поверхность полупроводника $n - Ge$ напылены два металла Al и Au , отделенные друг от друга тонким диэлектрическим слоем толщиной $150 - 500 \text{ \AA}$. Выбор металлов и полупроводника обусловлен тем, что контактный барьер на границе металл—полупроводник не должен быть слишком большим (для Al и Au на Ge этот барьер равен примерно $0,7 \text{ эВ}$). Кроме того, используя алюминий, несложно создать тонкий диэлектрический слой, разделяющий металлы.

Если соединить между собой гальванически оба металла и подать положительное смещение U на германий (запорное направление), то при определенном значении напряжения U_K возможна туннельная эмиссия электронов из металлов в германий через соответствующие потенциальные барьеры между металлами и полупроводником.



Подадим положительное смещение $U_{ЭК}$ между Ge и Au (эмиттером), чтобы туннельная эмиссия еще не начиналась.

На другой металл Al (базой) также подадим положительное смещение $U_{БЭ}$. Благодаря малой толщине диэлектрического слоя напряжение $U_{БЭ}$ будет увеличивать электрическое поле у участков поверхности Au , близлежащих к Al . Оно вызовет туннельную эмиссию электронов из Au , при этом большая часть электронов из эмиттера будет туннелировать в полупроводник, т. е. величина $a \approx 1$.

При этом любой из металлов может быть и эмиттером, и базой.

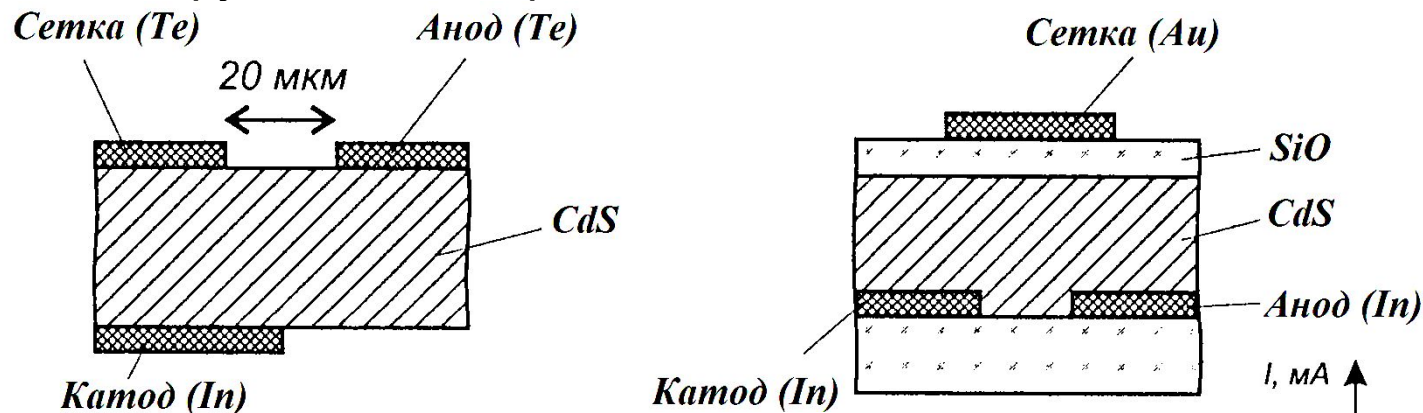
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства на многослойных тонкопленочных диэлектрических структурах

Диэлектрические триоды

Наличие хорошего инжектирующего контакта в многослойной диэлектрической структуре является необходимым условием работы диэлектрического диода.

Аналогично тому, как это реализуется в вакуумных лампах, можно осуществить переход от диэлектрического диода к диэлектрическому триоду – с инжектируемыми электронами.



Управляющий электрод (сетка) должен располагаться между катодом и анодом, и размер ячейки сетки h , т. е. расстояние между соседними штрихами сеточной структуры, должен быть порядка расстояния между катодом и анодом d , чтобы реализовать эффективное управление током.

